

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Tomišić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Marin Tomišić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojem mentoru prof. Dr. sc. Ivici Garašiću na strpljenju i stručnim savjetima tokom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se asistentici dr. sc. Maji Jurici na savjetima, strpljenju, potpori i velikoj pomoći.

Također zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Marin Tomišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum 23-02-2017 | Prilog |
| Klasa: 602-04/17-6/4 | |
| Ur.broj: 15-1703-17-82 | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARIN TOMIŠIĆ**

Mat. br.: 0035191694

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**ZNAČAJKE MODERNIH IZVORA STRUJE ZA MAG
ZAVARIVANJE**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**CHARACTERISTICS OF MODERN MAG WELDING POWER
SOURCES**

Opis zadatka:

Opisati izvore struje za MAG zavarivanje s posebnim naglaskom na oblik statičke i dinamičke karakteristike. Definirati mogućnosti određivanja parametara uz pomoć sinergijskih karakteristika kao i moguće opcije izbora parametara obzirom na različite kombinacije osnovnog materijala i zaštitnih plinova. Navesti funkcije koje kompenziraju pad jakosti struje ovisno o slobodnom kraju žice te mogućnosti koje stabiliziraju proces zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućem izvoru struje za zavarivanje provesti ispitivanja utjecaja kvalitete sinergijske karakteristike i funkcija za kompenziranje pada struje ovisno o slobodnom kraju žice. Ocijeniti kvalitetu sučelja sa stanovišta odabira i primjene različitih kombinacija parametara kao i utjecaj na poboljšanje kvalitete zavarivanja u realnim uvjetima.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

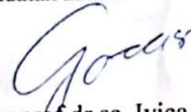
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.


2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:


Izv.prof.dr.sc. Ilica Garašić

v.d. predsjednika Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ:

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | VII |
| POPIS OZNAKA | VIII |
| POPIS KRATICA | IX |
| SAŽETAK..... | X |
| SUMMARY..... | XI |
| 1.UVOD | 1 |
| 2.KONVENCIONALNI NAČIN MAG ZAVARIVANJA | 2 |
| 2.1.Parametri MAG zavarivanja..... | 3 |
| 2.2.Dodatni materijal kod MAG zavarivanja | 8 |
| 2.3.Prednosti i nedostaci kod MAG zavarivanja | 9 |
| 3.IZVORI STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE..... | 10 |
| 3.1.Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje | 10 |
| 3.2.Prijenos metala kod MAG zavarivanja..... | 14 |
| 3.3.Suvremeni postupci kod MAG zavarivanja..... | 15 |
| 3.3.1.STT – Surface Tension Transfer..... | 15 |
| 3.3.2.FastROOT | 16 |
| 3.3.3.RMT – Rapid MAG Technology | 18 |
| 3.3.4.CMT-Cold Metal Transfer | 19 |
| 3.3.5.AC MIG | 20 |
| 4.ODREĐIVANJE PARAMETARA KOD MAG ZAVARIVANJA | 22 |
| 4.1.Sinergijske karakteristike | 22 |

| | |
|---|----|
| 4.2.Oprema za instaliranje sinergijskih krivulja i softvera – DATAGUN | 23 |
| 5.SPECIFIČNE FUNKCIJE INVERTERSKIH IZVORA STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE | 24 |
| 5.1.Wise Fusion | 24 |
| 5.2.WisePenetration | 25 |
| 5.3.WiseThin | 27 |
| 5.4.WiseRoot | 28 |
| 5.5.PulsedDip Transfer Process – Prijenos kratkim spojem i impulsom..... | 29 |
| 5.5.1.Upravljanje međuspremnikom žice | 30 |
| 6.EKSPERIMENTALNI DIO | 33 |
| 6.1.Uvod | 33 |
| 6.2.Izvor struje za zavarivanje | 34 |
| 6.3.Oprema za ispitivanje sinergijskih (dinamičkih) karakteristika | 36 |
| 6.4.Modularni sustav pogona MDS – 1002 | 37 |
| 6.5.Zaštitni plin..... | 38 |
| 6.6.Dodatni materijal | 39 |
| 6.7.Praktični dio..... | 40 |
| 6.7.1.Analiza funkcije Arc Length Correction (korekcija visine luka)..... | 40 |
| 6.7.1.1.Slobodni kraj žice 12 mm | 40 |
| 6.7.1.2.Slobodni kraj žice 17 mm | 44 |
| 6.7.1.3.Slobodni kraj žice 22 mm | 47 |
| 6.8.Analiza rezultata | 51 |
| 7.ZAKLJUČAK | 53 |

| | |
|-----------------|----|
| LITERATURA..... | 54 |
| PRILOZI..... | 56 |

POPIS SLIKA:

| | |
|---|----|
| Slika 1. MAG zavarivanje [2] | 1 |
| Slika 2. Oprema za MAG zavarivanje [4] | 2 |
| Slika 3. Utjecaj induktiviteta na promjenu struje [8] | 5 |
| Slika 4. Slobodni kraj žice [4] | 6 |
| Slika 5. Ovisnost protoka plina o jakosti struje i promjeru žice [5] | 7 |
| Slika 6. Presjeci punjenih žica [11] | 8 |
| Slika 7. Blok dijagram inverterskog izvora struje [12] | 11 |
| Slika 8. Dijagram struje i napona koji prikazuje ravnu (blagopadajuću) karakteristiku [12] | 12 |
| Slika 9. Dinamička karakteristika napona i struje i faze prijenosa metala električnim lukom kratkog spoja [12] | 13 |
| Slika 10. Dinamička karakteristika $1-u=f(t)$, $2-i=f(t)$ STT postupka [14] | 16 |
| Slika 11. Slijed odvajanja kapljice pri STT zavarivanju [14] | 16 |
| Slika 12. Dinamička karakteristika $1-u=f(t)$, $2-i=f(t)$ FastROOT postupka [14] | 17 |
| Slika 13. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT postupku [14] | 17 |
| Slika 14. Jakost struje o ovisnosti o brzini žice [15] | 18 |
| Slika 15. Shematski prikaz povratnog gibanja žice [14] | 19 |
| Slika 16. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [14] | 19 |
| Slika 17. Makroizbrusak spoja aluminijskog i pocinčanog lima izvedenog CMT postupkom [14] | 20 |
| Slika 18. Dinamička karakteristika $i=f(t)$ (žuti oscilogram) i $u=f(t)$ (crveni oscilogram) [14] | 21 |
| Slika 19. DataGun [19] | 23 |
| Slika 20. DataGun priključen na izvor struje za zavarivanje [19] | 23 |
| Slika 21. Primjena WiseFusion-a, osnovni materijal aluminij [20] | 25 |
| Slika 22. Profil zavara uz promjene slobodnog kraja žice kod standardnog MAG postupka i primjenom WisePenetration funkcije [20] | 26 |
| Slika 23. Primjena WisePenetration-a [20] | 26 |
| Slika 24. Metalna kutija zavarena WiseThin-om [20] | 27 |

| | |
|---|----|
| Slika 25. Primjer korištenja WiseRoot-a [21] | 28 |
| Slika 26. Princip PulsedDip Transfer process pri zavarivanju u zaštiti CO ₂ [22] | 30 |
| Slika 27. Shematski prikaz BufferPositionControl sustava [22] | 31 |
| Slika 28. Efekt djelovanja BufferPositionControl-a [22] | 32 |
| Slika 29. Izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 320i | 34 |
| Slika 30. Korisničko sučelje izvora struje | 35 |
| Slika 31. Oprema za snimanje dinamičkih karakteristika | 36 |
| Slika 32. Strujna kliješta..... | 36 |
| Slika 33. Shema spajanja osciloskopa s izvorom struje i računalom [17] | 37 |
| Slika 34. Modularni sustav pogona MDS-1002 | 37 |
| Slika 35. Boca zaštitnog plina Ferroline C18..... | 38 |
| Slika 36. Specifikacija dodatnog materijala [24] | 39 |
| Slika 37. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 12 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10..... | 41 |
| Slika 38. Izgled navara oznake 1.A..... | 41 |
| Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 12 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost 0 | 42 |
| Slika 40. Izgled navara oznake 2.A..... | 42 |
| Slika 41. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 12 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost +10..... | 43 |
| Slika 42. Izgled navara oznake 3.A..... | 43 |
| Slika 43. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 17 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost -10..... | 44 |
| Slika 44. Izgled navara oznake 1.B | 45 |
| Slika 45. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 17 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost 0 | 45 |
| Slika 46. Izgled navara oznake 2.B | 46 |
| Slika 47. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 17 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost +10..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Slika 48. Izgled navara oznake 3.B | 47 |
| Slika 49. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 22 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost -10..... | 48 |
| Slika 50. Izgled navara oznake 1.C | 48 |
| Slika 51. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 22 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost 0 | 49 |
| Slika 52. Izgled navara oznake 2.C | 49 |
| Slika 53. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 22 mm i Korekcije visine luka za postavljenu vrijednost +10..... | 50 |
| Slika 54. Izgled navara oznake 3.C | 50 |

POPIS TABLICA:

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Vrijednost jakosti struje o ovisnosti o promjeru žice [6] | 3 |
| Tablica 2. Ovisnost napona o drugim parametrima [7]..... | 4 |
| Tablica 3. Ovisnost slobodnog kraja žice o jakosti struje i promjeru žice [7] | 6 |
| Tablica 4. Preporučene vrijednosti protoka plina pri zavarivanju ugljičnih i niskolegiranih čelika [10]..... | 7 |
| Tablica 5. Tehničke karakteristike izvora struje Fronius TPS 320i [23]..... | 35 |
| Tablica 6. Srednje vrijednosti parametara koji su se izmjenjivali tokom navarivanja za slobodni kraj žice 12 mm | 40 |
| Tablica 7. Srednje vrijednosti parametara koji su se izmjenjivali tokom navarivanja za slobodni kraj žice 17 mm | 44 |
| Tablica 8. Srednje vrijednosti parametara koji su se izmjenjivali tokom navarivanja za slobodni kraj žice 22 mm | 47 |
| Tablica 9. Prikaz promjene vremena trajanja perioda i kratkih spojeva u eksperimentu..... | 51 |

POPIS OZNAKA:

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|--------|----------|-----------------------------|
| I | A | Jakost struje zavarivanja |
| U | V | Napon |
| d | mm | Promjer dodatnog materijala |
| f | Hz | Frekvencija |
| Q | kJ/cm | Unos topline |
| t | s | Vrijeme |
| v_z | m/min | Brzina dodavanja žice |
| v_z | cm/min | Brzina zavarivanja |

POPIS KRATICA:

| Kratika | Opis |
|-----------------|-----------------------------------|
| MAG | Metal Active Gas |
| MIG | Metal Inert Gas |
| TIG | Tungsten Inert Gas |
| CC | Constant Current |
| CV | Constant Voltage |
| STT | Surface Tension Transfer |
| RMT | Rapid MAG Technology |
| CMT | Cold Metal Transfer |
| Ar | Argon |
| CO ₂ | Ugljični dioksid |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |

SAŽETAK:

Tema ovog završnog rada je „Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje“ i sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada opisani su izvori struje za MAG zavarivanje sa naglaskom na statičku i dinamičku karakteristiku. Posebno je analiziran način određivanja parametara uz pomoć sinergijskih karakteristika. Opisane su specifične funkcije koje kompenziraju pad jakosti struje ovisno o slobodnom kraju žice te mogućnosti koje stabiliziraju i unaprjeđuju proces zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu na izvoru struje Fronius TPS 320i provela su se ispitivanja utjecaja kvalitete sinergijske karakteristike i funkcija za kompenziranje pada struje ovisno o slobodnom kraju žice. Analizirana je funkcija Korekcija visine luka (eng. Arc length correction), te se provelo ispitivanje navedene funkcije za različite slučajeve slobodnog kraja žice.

Ključne riječi: MAG izvori struje, sinergijske karakteristike, statička i dinamička karakteristika, Korekcija visine luka.

SUMMARY:

Topic of this thesis is „Characteristics of modern MAG welding power sources“. It consist of two parts, theoretical and experimental.

In the theoretical part MAG welding power sources and their statical and dinamical characteristics is decribed. Determination of welding parameters by synergic characteristics is described too. Specifical functions that compensates deviations of electrical current depended of wire height and possibilities to stabilisation and development of welding process.

In experimental part of work, tests on power source Fronius TPS 320i has been made. Test was about quality and influence of synergic characteristics and compensations of deviations for electrical current dependet of wire height. Arc length correction function is analyzed too and it was been tested for various amount of wire height.

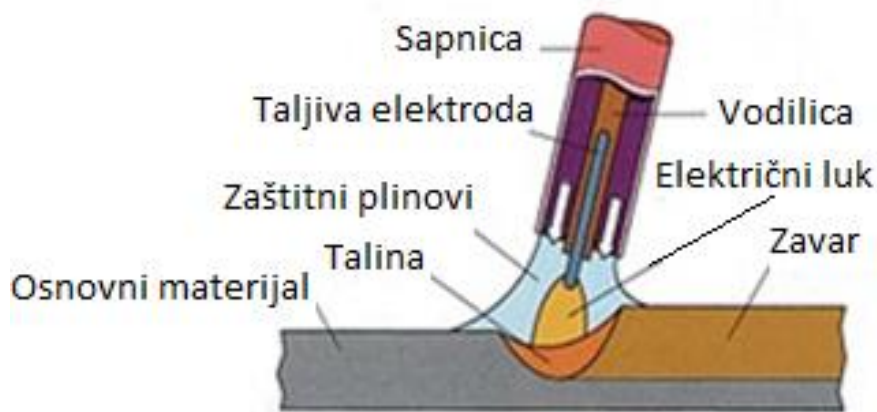
Key words: MAG welding sources, synergic characteristics, statica and dynamical characteristic, Arc length correction

1. UVOD

Zavarivanje kao najučinkovitiji postupak spajanja materijala danas se gotovo koristi u svim granama industrije, u brodogradnji, autoindustriji, avioindustriji, za izradu platformi, za spajanje cjevovoda, za izradu kotlova. Svakim danom postavljaju se viši zahtjevi kvalitete i sigurnosti zavarenog spoja uz minimalne troškove izrade. Da bi se ti zahtjevi ispunili razvijen je MAG postupak zavarivanja.

MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (slika 1.). Razvio se sredinom 20. stoljeća u SAD-u u avioindustriji AirCo [1]. Od svih postupaka zavarivanja MAG postupak je najzastupljeniji, te se stalno unapređuje kako bi se spajanje metala provodilo na najekonomičniji način.

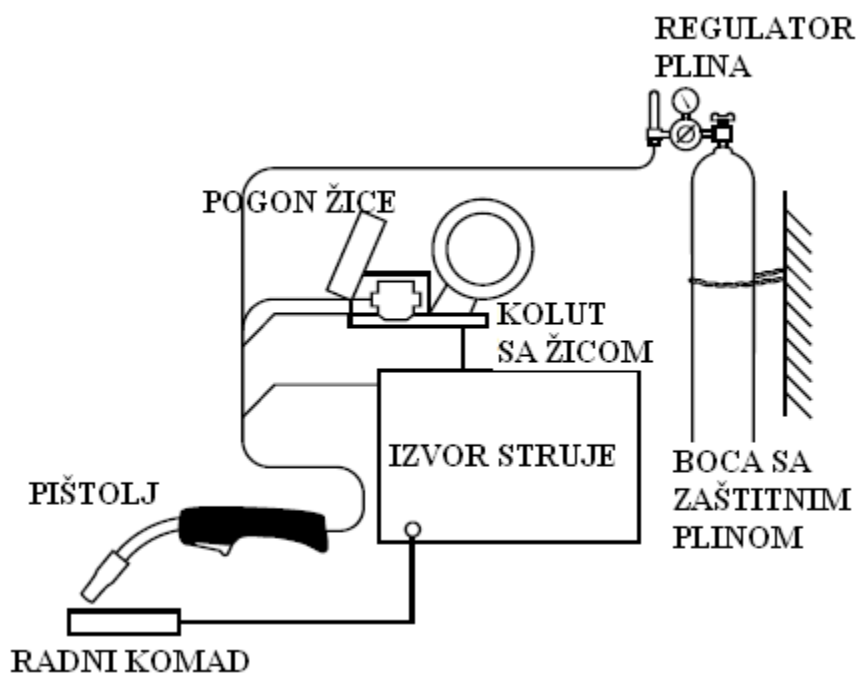
U ovom radu bit će opisane značajke modernih izvora struje kod MAG zavarivanja, kao i mogućnosti određivanja parametara uz pomoć sinergijskih karakteristika. Bit će riječi o suvremenim funkcijama aparata za MAG zavarivanje koje značajno olakšavaju i unaprjeđuju sam postupak.



Slika 1. MAG zavarivanje [2]

2. KONVENCIONALNI NAČIN MAG ZAVARIVANJA

MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina. Električni luk zagrijava radni komad dok se kontinuirano dovodi taljiva elektroda (žica), sve u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku, pod tlakom. MAG zavarivanje nije jedini postupak elektrolučnog zavarivanja. Zajedničko svim postupcima elektrolučnog zavarivanja je da se pomoću električnog luka tali osnovni materijal. Električni luk je trajno i snažno pražnjenje u ionizirajućem plinu na prostoru između vrha elektrode i radnog komada u strujnom krugu tijekom elektrolučnog zavarivanja. Pogonski sustav dovodi žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk. Moguće je zavarivati široki spektar metala kao što su ugljični čelici, nehrđajući čelici, nikal [3]. Na slici 2 prikazana je oprema potrebna za MAG zavarivanje.



Slika 2. Oprema za MAG zavarivanje [4]

2.1. Parametri MAG zavarivanja

Osnovni parametri MAG zavarivanja su: jakost struje, napon, induktivitet, slobodni kraj žice, protok plina i brzina zavarivanja. Dodatni parametri su promjer žice, nagib pištolja, položaj zavarivanja te depozit [4,5,6]. Parametri zavarivanja vrlo su važni za kvalitetu zavora jer samo uporabom pravilnih i odgovarajućih parametara može se postići zadovoljavajuća kvaliteta.

a) Jakost struje

Struja zavarivanja najvažniji je parametar. O njoj vrijednosti najviše zavisi način prijenosa metala, veličina penetracije, količina rastaljenog materijala, brzina zavarivanja i stabilnost električnog luka. U tablici 1. navedene su preporučene vrijednosti struje za MAG zavarivanje u ovisnosti o promjeru žice [4].

Tablica 1. Vrijednosti jakosti struje o ovisnosti o promjeru žice[6]

| Promjer žice, mm | Jakost struje, A |
|------------------|------------------|
| 0,8 | 40 - 145 |
| 0,9 | 50 - 180 |
| 1,2 | 75 - 250 |

Jakost struje ovisi o debljini i vrsti materijala koji se zavaruje, položaju zavarivanja te promjeru žice. Brzina dovođenja žice proporcionalno ovisi o jakosti struje. Što je struja veća i brzina dovođenja žice je veća [4].

b) Napon

Napon se odnosi na napon električnog luka te je jako važan parametar pošto o njemu ovisi duljina, širina i stabilnost električnog luka. Duljina električnog luka proporcionalno ovisi o naponu. Što je veći napon, veća je i duljina luka.

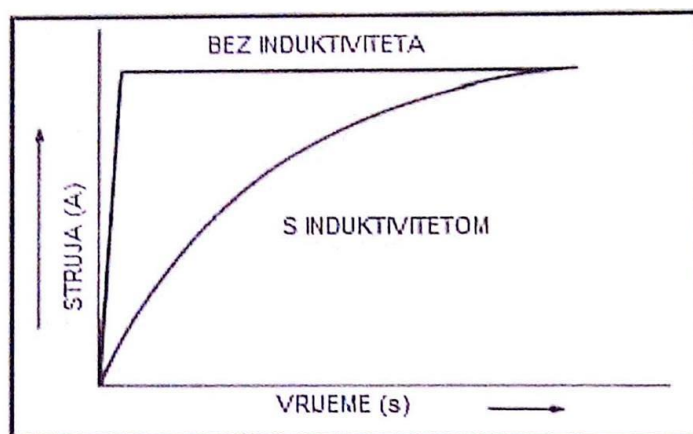
Potrebni napon za pravilno izvođenje postupka varira ovisno o različitim vrstama prijenosa metala i promjeru dodatnog materijala. Kod prijenosa kratkim spojevima koriste se niski naponi od 13 do 21 V. Prijenos prijelaznim lukom zahtijeva napon od 22 do 25 V. Štrcajući luk zahtijeva napon od 25 do 40 V. U tablici 2. prikazana je ovisnost napona o drugim parametrima. Odnosi se na običan konstrukcijski čelik te sučeljeni spoj [4].

Tablica 2. Ovisnost napona o drugim parametrima [7]

| Debljina materijala (mm) | Promjer žice (mm) | Jakost struje (A) | Napon (V) | Brzina zavarivanja (cm/min) |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------------------------|
| 1,2 | 0,8;0,9 | 70-80 | 18-19 | 45-55 |
| 1,6 | 0,8;1,0 | 80-100 | 18-19 | 45-55 |
| 2 | 0,8;1,0 | 100-110 | 19-20 | 50-55 |
| 2,3 | 1,0;1,2 | 110-130 | 19-20 | 50-55 |
| 3,2 | 1,0;1,2 | 130-150 | 19-21 | 40-50 |
| 4,5 | 1,2 | 150-170 | 21-23 | 40-50 |
| 6 | 1,2 | 220-260 | 24-26 | 40-50 |
| 9 | 1,2 | 320-340 | 32-34 | 40-50 |

c) Induktivitet

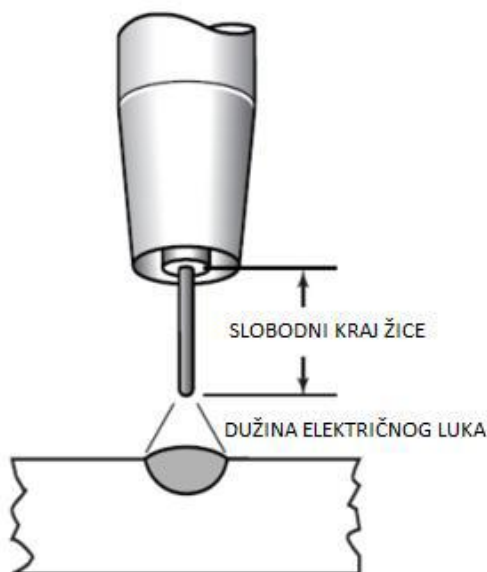
Uloga podešavanja induktiviteta je reguliranje brzine promjene jakosti struje. Što je induktivitet veći, frekvencija je manja i obrnuto. Induktivitet se može podešavati kod većine uređaja za MAG zavarivanje. Može biti fiksno podešen ili se može mijenjati. Na slici 3. prikazana je uloga induktiviteta odnosno utjecaj na promjenu jakosti struje. Naime, struja se ne mijenja instantno, odnosno čim se promijeni vrijednost, nego ima blagi zaostatak. Za taj zaostatak je zadužen induktivitet [4].



Slika 3. Utjecaj induktiviteta na promjenu struje [8]

d) Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice je udaljenost od vrha kontaktne vodilice do početka električnog luka. Slobodni kraj žice je važan parametar i utječe na jakost struje koja protječe kroz električni luk. Povećanje slobodnog kraja žice povećava strujni otpor i struja u luku se smanjuje dok smanjivanje slobodnog kraja žice dovodi do smanjenja otpora i povećanja jakosti struje. Razlikuje se za različite prijenose metala. Kod prijenosa kratkim spojevima trebao bi iznositi od 10 do 12 mm [4]. Kod prijenosa štrcajućim lukom ili pak zavarivanja impulsnim strujama iznosi od 19 do 25 mm. Još jedna bitna stavka kod ovog parametra je da pravilno podešavanje dovodi do dobre i jednolične penetracije duž cijelog zavora. Na slici 4. prikazan je slobodni kraj žice. U tablici 3. dan je prikaz ovisnosti slobodnog kraja žice o jakosti struje i promjeru žice [4].



Slika 4. Slobodni kraj žice [4]

Tablica 3. Ovisnost slobodnog kraja žice o jakosti struje i promjeru žice [7]

| Promjer žice (mm) | Jakost struje (A) | Slobodni kraj žice (mm) |
|----------------------|----------------------|----------------------------|
| 0,6;0,8 | 100 max | 10 max |
| 0,9;1,2 | 100-200 | 10-15 |
| 1,2;1,4 | 200-350 | 15-20 |
| 1,6;2,0 | 350 min | 20-25 |

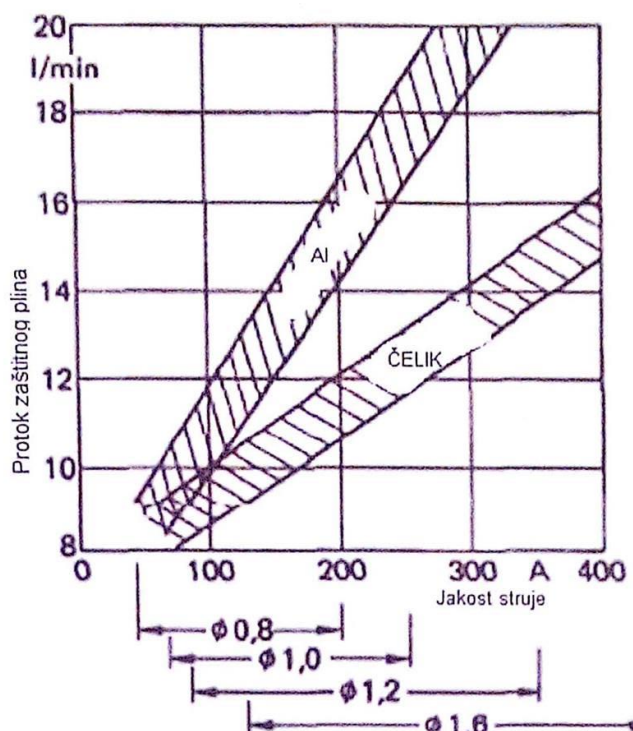
e) Protok plina

Pravilan izbor odgovarajućeg plina te njegovog protoka za zavarivanje je od značajnog utjecaja što se odražava na penetraciju, širinu zavora, brzinu zavarivanja, zagrijavanje radnog komada, profil zavora, itd.

Protok zaštitnog plina ovisi o jakosti struje, promjeru žice, obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Povećana potrošnja zaštitnog plina javlja se na otvorenom prostoru i pri zavarivanju kutnih spojeva sa vanjske strane. U slučaju premalog protoka plina može doći do pojave poroznosti [4,9]. U tablici 4. navedene su preporučene vrijednosti protoka plina pri MAG zavarivanju ugljičnih i niskolegiranih čelika. Slika 5. prikazuje ovisnost protoka plina o jakosti struje i promjeru žice pri zavarivanju čelika.

Tablica 4. Preporučene vrijednosti protoka plina pri zavarivanju ugljičnih i niskolegiranih čelika [10]

| Debljina materijala (mm) | Promjer žice (mm) | Napon (V) | Brzina dobavljanja žice (cm/s) | Zaštitni plinovi | Protok zaštitnog plina (l/min) |
|--------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1,6 | 0,9 | 18 | 6 | Ar 75%, CO ₂ 25% | 12 |
| 3,2 | 0,9 | 20 | 10 | Ar 75%, CO ₂ 25% | 12 |
| 4,7 | 0,9 | 20 | 11 | Ar 75%, CO ₂ 25% | 12 |
| 6,4 | 0,9 | 21 | 11 | Ar 75%, CO ₂ 25% | 12 |
| 6,4 | 1,1 | 22 | 10 | Ar 75%, CO ₂ 25% | 12 |



Slika 5. Ovisnost protoka plina o jakosti struje i promjeru žice [5]

f) Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja i odabranoj jakosti struje. Suviše velika brzina zavarivanja izaziva prekomjerno štrcanje materijala, malu penetraciju, ugorine i nejednolik

izgled zavora. Pri suviše maloj brzini zavarivanja stvara se velika količina pregrijane taline [7].

2.2. Dodatni materijal kod MAG zavarivanja

Dodatni materijali za MAG postupak zavarivanja (elektrodne žice za zavarivanje) moraju ispunjavati određene uvjete, kako u pogledu kemijskog sastava, tako i u pogledu kvalitete površine i odmatanja s koluta za vrijeme zavarivanja.

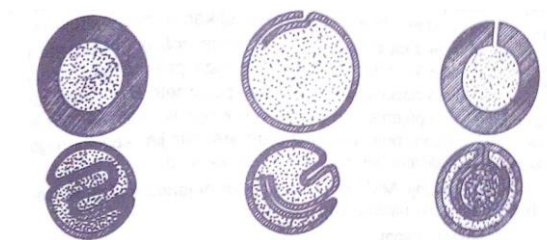
Obzirom na način proizvodnje i tehnološke karakteristike dodatni materijali se za ovaj postupak zavarivanja mogu podijeliti u dvije grupe [11]:

- Pune elektrodne žice
- Punjene elektrodne žice

Pune elektrodne žice, koje se koriste za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, pobakrene su radi zaštite od korozije. Isporučuju se na plastičnim ili metalnim kolutima [11].

Punjene elektrodne žice se proizvode od metalne trake debljine do 0,5 mm, koja se stavlja po dužini i puni praškom određenog sastava. Žica u svojoj unutrašnjosti sadrži elemente koji stvaraju trosku, stabiliziraju električni luk, vrše dezoksidaciju i legiranje zavora. Ovisno o vrsti praška razlikuju se bazične i rutilne punjene elektrodne žice, koje se međusobno razlikuju po zavarivačkim i mehaničkim osobinama, te po području primjene [11].

Zavarivanje punjenim žicama može se izvoditi uz upotrebu zaštitnog plina ili bez njega, što ovisi o konstrukciji (presjeku) žice. Žice koje se upotrebljavaju bez zaštitnog plina (samozaštitne žice), imaju dvostruki plašt i dvostruku jezgru i one pri zavarivanju stvaraju veću količinu plinova. Time se postiže bolja stabilnost električnog luka, a rastaljeni metal se štiti troskom i plinom koji nastaje taljenjem jezgre. Slika 6. prikazuje presjeke punjenih žica [11].



Slika 6. Presjeci punjenih žica [11]

2.3. Prednosti i nedostaci MAG zavarivanja

MAG postupak zavarivanja ima široko područje primjene, stoga u nastavku slijede prednosti i nedostaci MAG postupka, ovisno o tome kako i gdje se postupak koristi.

Prednosti MAG zavarivanja [11]:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- široki raspon debljina osnovnih materijala,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju,
- moguća primjena za lemljenje.

Nedostaci MAG zavarivanja [11]:

- kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite (vjetar otpuhuje zaštitni plin),
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost, štrcanje),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubitci dodatnog materijala i potreba za dodatnim čišćenjem),
- složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija).

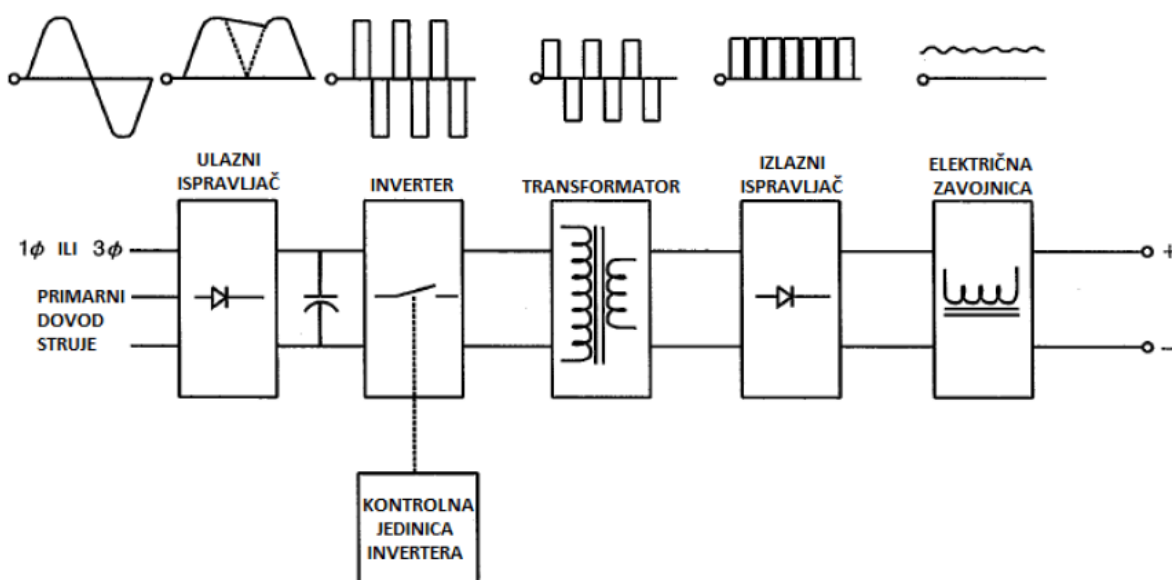
3. IZVORI STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE

Izvori struje za zavarivanje su uređaji za proizvodnju struje različitih vrsta i svojstava, kojima se ostvaruje postupak zavarivanja. Ovisno o unutrašnjoj građi izvora struje, o čemu ovisi vrsta i svojstva izlazne struje, izvori struje za zavarivanje dijele se na: transformatore, ispravljače i invertore kao uređaje koji se spajaju na električnu mrežu te na motore s unutrašnjim izgaranjem s generatorom koji se koriste na mjestima gdje je električna mreža slaba ili je uopće nema. Vrstu izvora struje odabiremo na temelju željene izlazne struje i njenih svojstava [12]. Danas se najčešće koriste inverterski izvori struje kod MAG zavarivanja.

3.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje

Dizajn i mogućnosti izvora struje za zavarivanje su se promijenili i nastavljaju se, ubrzano, mijenjati. Izvori struje za zavarivanje bazirani na inverterskoj tehnologiji su pokretači tih promjena [13].

Inverterski izvori struje za zavarivanje razvijeni su korištenjem visoko energetske poluvodiča kao što su IGBT (eng. Insulated Gate Bipolar Transistor) koji omogućavaju prekidni izvor napajanja koji ima mogućnost da podnese velika strujna opterećenja izazvana postupkom zavarivanja. Inverter je elektronički sklop koji, prije transformacije, pretvara izmjeničnu u istosmjernu struju. Glavni razlog stavljanja invertera prije transformatora je u tome što broj zavoja transformatora, linearno opada s povećanjem frekvencije na ulazu što za posljedicu ima korištenje, dimenzijski, malih izvora struje. Nakon pretvaranja struje, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventni napon (10000 do 20000 Hz). Prolaskom ove struje kroz transformator nastaje izmjenična struja, niskog napona ali vrlo visoke jakosti struje. Slika 7. prikazuje blok dijagram punovalnog ispravljača s Graetзовim spojem na kojem je vidljiva građa inverterskih izvora struje za zavarivanje [12].



Slika 7. Blok dijagram inverterskog izvora struje [12]

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju: visoku iskoristivost (oko 90%), vrlo preciznu regulaciju izlaznih parametara, zaštitu od preopterećenja, mogućnost promjene parametara zavarivanja tijekom rada u realnom vremenu, kontrolu impulsne struje (jakost, gustoća struje, omjer na kojem je polu struja duže zadržana, frekvencija impulsa te uzlazna i silazna karakteristika), napredniju kontrolu dodavanjem novog programskog paketa, brže vrijeme reakcije u odnosu na jednostavne transformatore i ispravljače te su manjih dimenzija nego transformatori [12].

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju mogućnost zavarivanja zavarenih spojeva visoke kvalitete različitim postupcima zavarivanja na istom uređaju. Tako se na istom uređaju može zavarivati REL, MAG, MIG, TIG postupcima te je moguće i žlijebljenje. Zbog svoje efikasnosti inverterski izvori struje za zavarivanje omogućavaju uštede električne energije [13].

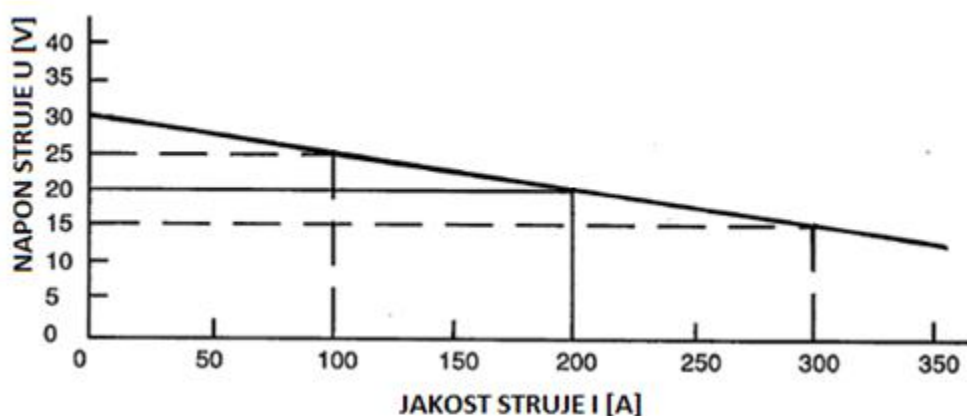
Statička karakteristika izvora struje za zavarivanje opisuje promjenu napona s porastom struje zavarivanja. Karakteristika je prikazana krivuljom napon struje (U) – jakost struje (I) dijagramu te je podijeljena najčešće na dva glavna tipa [12]:

- Strmopadajuća – konstantna jakost struje (eng. Constant Current, CC)
- Ravna – konstantan napon struje (eng. Constant Voltage, CV)

Kod izvora struje MAG zavarivanja statička karakteristika je ravna. Ravna – konstantan napon struje (eng. Constant Voltage, CV) je karakteristika gdje izvor struje održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja visinom električnog luka. Iako se uzima da je krivulja konstantna, ona ipak pokazuje blagi pad uzrokovan unutarnjim otporima građe izvora struje za zavarivanje [12].

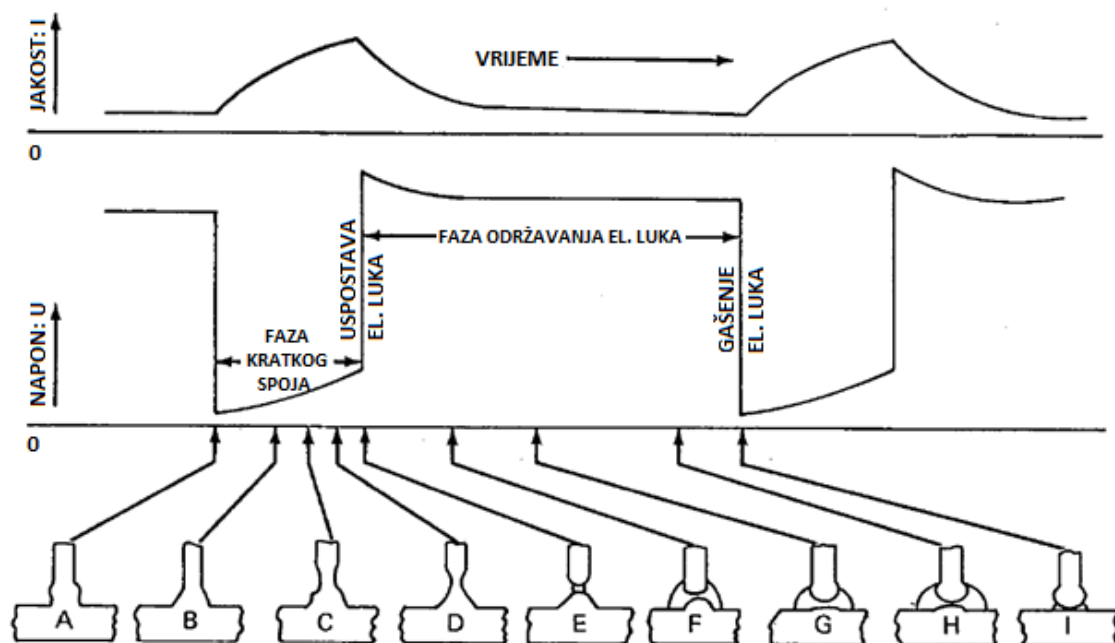
Glavna razlika između statičkih karakteristika se očituje u načinu vođenja procesa. Kod CV karakteristike se teži održati visinu luka konstantnom, ali bilo kakva promjena visine luka povlači za sobom drastičniju promjenu jakosti struje - što ujedno znači i veliku promjenu količine depozita koja se polaže na radni komad. Takav efekt se naziva također i „samoregulacija“ električnog luka [12].

Dodavač žice MAG postupaka je kontroliran izvorom struje za zavarivanje. S povećanjem napona se povećava i brzina dodavanja žice – tj. količina depozita, a s obzirom da promjene napona nisu skokovite kao kod ručnih postupaka, dobiva se kontinuirana brzina dodavanja depozita uz mogućnost fine kontrole [12]. Slika 8. prikazuje dijagram napona i struje koji prikazuju ravnu (blagopadajuću) statičku karakteristiku (CV, constant voltage).



Slika 8. Dijagram struje i napona koji prikazuje ravnu (blagopadajuću) karakteristiku [12]

Dinamička karakteristika kod izvora struje je operativna karakteristika mjerena osciloskopom, pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu detaljnog promatranja ponašanja električnog luka – promjene struje i napona tijekom formiranja i odvajanje rastaljene kapljice metala [12]. Na slici 9. prikazana je dinamička karakteristika struje i napona i prikaz faza prijenosa metala kratkim spojevima.



Slika 9. Dinamička karakteristika napona i struje i faze prijenosa metala kratkim spojevima [12]

3.2. Prijenos metala kod MAG zavarivanja

Prijenos metala u električnom luku rezultat je interakcije više fizikalnih fenomena od koji elektromagnetska sila ima dominantnu ulogu. Zbog malog promjera žice moguće je kvalitetno i trenutačno upravljanje cijelim procesom odvajanja sferne kapljice rastaljenog metalnog materijala što se može dogoditi u kratkom spoju ili slobodnim letom kapljice [14].

Kod konvencionalnih izvora struje za zavarivanje ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku ovisno o jačini struje i napona, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Pri tome razlikuje se područje kratkih spojeva, područje mješovitog luka te područje štrcajućeg luka. Impulsno zavarivanje predstavlja kontrolirani prijenos materijala slobodnim letom i to u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje. Klasifikacija IIW-a definira tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom: prirodni prijenos, kontrolirani prijenos i modificirano (prošireno) područje prijenosa [14].

Ono što omogućuju novi koncepti MAG zavarivanja je svojevrsna interakcija različitih opcija prijenosa materijala u području parametara i energijskog nivoa gotovo neprimjenjivog kod konvencionalnih postupaka i izvora struje za zavarivanje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kod kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (tzv. waveform control), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta i uvođenjem izmjenične struje te uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Danas se zahvaljujući razvoju izvora struje za zavarivanje moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da se kontrola procesa provodi u svakom trenutku primjenom digitalne tehnologije [14].

Suvremeni postupci MAG zavarivanja primjenjuju sve nabrojene mehanizme kako bi se olakšalo zavarivanje tankih materijala, smanjio unos topline i deformacije, omogućilo lakše zavarivanje korijenskog prolaza, raznorodnih materijala te povećanih razmaka između limova. Međutim, osim ovih prednosti koje u biti predstavljaju zavarivanje u području razine

parametara kratkih spojeva razvijeni su i sustavi modificiranog štrcajućeg luka koji se odlikuju znatno poboljšanom penetracijom [14].

3.3. Suvremeni postupci MAG zavarivanja

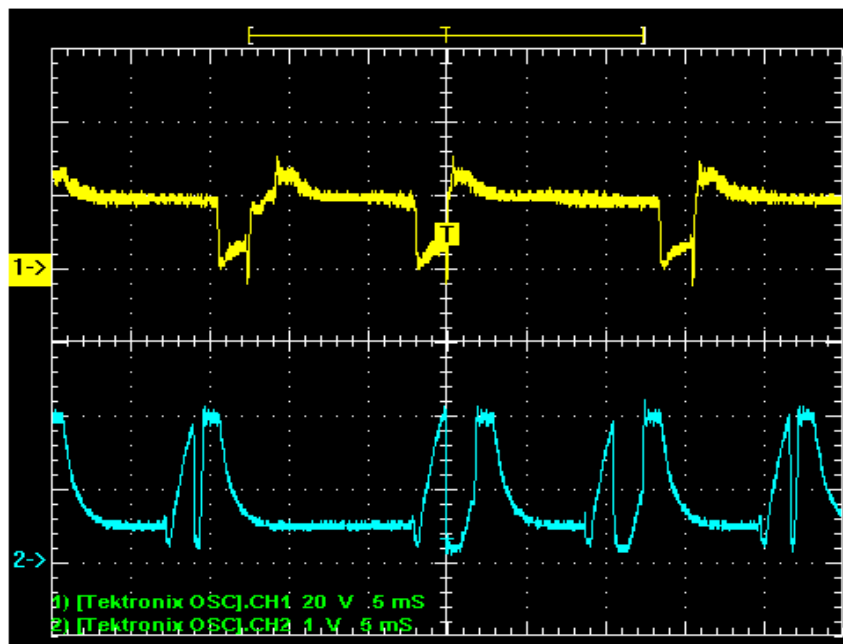
U današnjoj praksi postoji dvadesetak postupaka MAG zavarivanja koji koriste modificirane prijenose metala i to prvenstveno u području niskog unosa topline kombinirajući kratki spoj i strujnim pulsom ali postoje i varijante koje apliciraju modificirani štrcajući luk. Karakteristični postupci koji integriraju specifične koncepte prijenosa metala jesu [14] :

- STT – Surface Tension Transfer
- FastROOT
- RMT
- CMT – Cold Metal Transfer
- AC MIG

3.3.1. STT – Surface Tension Transfer

STT postupak za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljice rastaljenog metala te istovremeno maksimizira utjecaj površinske napetosti. Međutim, nakon tog odvajanja slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava vrh žice za novi ciklus odvajanja kapljice. Završna struja tog impulsa, tj. njen nagib bitno utječe na unos topline te se kao parametar posebno regulira. Rezultat je vrlo nizak unos energije uz eliminaciju štrcanja [14]. Na slici 10. prikazana je dinamička karakteristika STT postupka dok je slijed odvajanja kapljice prikazan na slici 11.

Glavna primjena STT postupka je za zavarivanje korijenskog prolaza, jer kvalitetno odvajanje kapljice bez štrcanja uz mali unos topline olakšava rad. Uz to, primjena MAG postupka tj. pune žice kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće umanjuje rizik od nastanka hladnih pukotina zbog vrlo niske količine difundiranog vodika i eliminira potrebu zavarivanja tzv. „vrućeg“ sloja kod izgradnje cjevovoda [14].

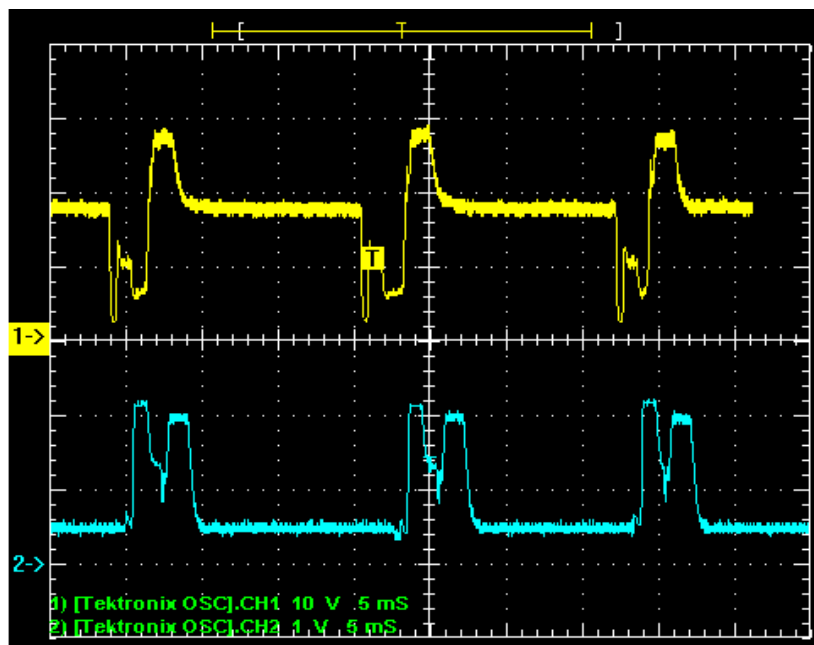
Slika 10. Dinamička karakteristika 1 – $u=f(t)$; 2 – $i=f(t)$ STT postupka [14]

Slika 11. Slijed odvajanja kapljice pri STT zavarivanju [14]

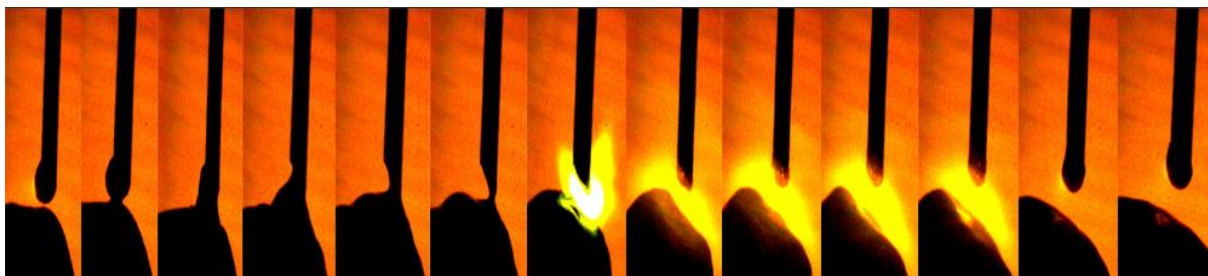
3.3.2. FastROOT

Osnovni koncept FastROOT postupka zasniva se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima što rezultira niskim unosom energije. Pri zavarivanju ovim postupkom napon i struja zavarivanja su digitalno kontrolirani. Obrazac kombinacije struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa za zagrijavanje javlja se i u ovom slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkog spoja u kojem dolazi do odvajanja kapljice aktivira se drugi strujni interval koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnog luka i taline do slijedećeg kratkog spoja. Da bi se realizirao ovako sofisticirani prijenos metala u električnom luku potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u

svakom trenutku odvajanja kapljice što rezultira prijenosom metala bez štrcanja. Dinamička karakteristika FastROOT postupka prikazana je na slici 12. dok slika 13. prikazuje slijed odvajanja kapljice u električnom luku [14].



Slika 12. Dinamička karakteristika 1 – $u=f(t)$, 2- $i=f(t)$ FastROOT postupka [14]

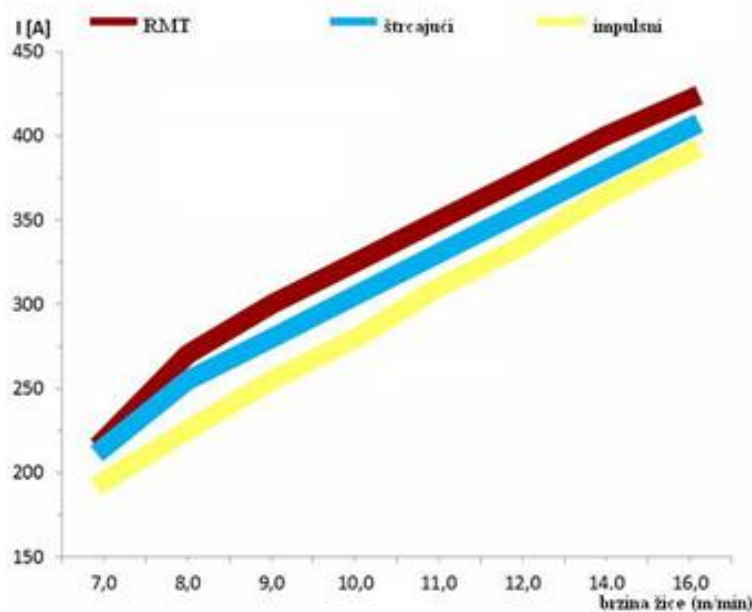


Slika 13. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT postupku [14]

Glavna primjena FastROOT postupka je zavarivanje korijenskog prolaza gdje se regulacijom parametara sekundarnog strujnog pulsa može precizno utjecati na oblik provara. Osim za korijenski prolaz, FastROOT je zbog niskog unosa energije pogodan za zavarivanje tankih limova (nelegirani i visokolegirani čelik, Ni legure) poglavito u situacijama većeg razmaka između komada [14].

3.3.3. RMT – Rapid MAG Technology

RMT postupak zavarivanja temelji se na koncentriranom štrcajućem prijenosu dodatnog materijala. Kod RMT postupka električni luk daje i do 10% više energije za istu brzinu dodavanja žice nego što je to slučaj s konvencionalnim MAG postupkom. Na slici 14. dana je usporedba jačine struje u ovisnosti od brzine žice za RMT luk, štrcajući i impulsni luk [15].



Slika 14. Jakost struje u ovisnosti o brzini žice [15]

Kod postupaka RMT MAG prijenos materijala zbiva se u vrlo sitnim kapljicama, pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2-3 kHz. Tim mehanizmom još se sužava jezgra luka, snižava napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk, što rezultira većom koncentracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom [16].

Zbog karakteristike povećanog unosa koncentrirane topline i odlične penetracije postupak RMT pogodan je za zavarivanje debljih materijala, a kutni zavareni spojevi do 8 mm mogu se zavarivati bez pripreme spoja [15].

3.3.4. CMT-Cold Metal Transfer

CMT postupak predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje tj. povratno gibanje žice. Karakteristično je da se odvajanje

kapljice odvija u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jednostavno ne bi bio dovoljan. U ovom slučaju povratno gibanje žice kompenzira nedostatak toplinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri vrlo niskoj jačini struje. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje gibanjem žice a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Frekvencija povratnog gibanja žice je najčešće između 60 i 80 Hz što zahtjeva vrlo sofisticiranu kontrolu gibanja žice i primjenu određenih rješenja poput ugradnje dodatnog servomotora u pištolj za zavarivanje i ugradnju međuspremnik žice tzv. „wire buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom [14]. Na slici 15. dan je shematski prikaz povratnog gibanja žice, a na slici 16. prikazan je slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka.



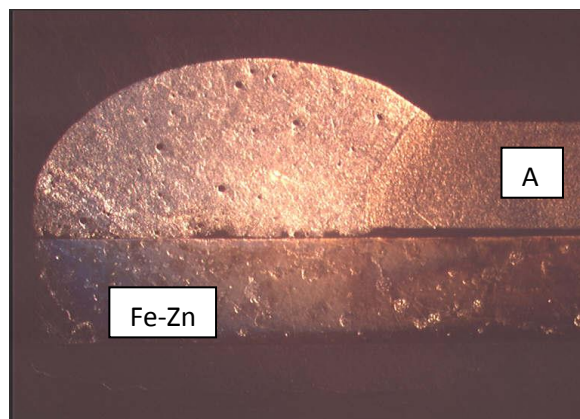
Slika 15. Shematski prikaz povratnog gibanja žice [14]



Slika 16. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [14]

U graničnim slučajevima kada se zahtijeva veći unos topline od onog koji može ostvariti CMT proces postoji mogućnost ubacivanja strujnih impulsa koji daju više topline i bolju penetraciju i to između ciklusa odvajanja kapljice [14].

Primjena CMT postupka prvenstveno se odnosi na područje MIG tvrdog lemljenja, zavarivanje tankih limova (aluminij, nelegirani i nehrđajući čelik) kao i spajanje aluminija i pocinčanog lima. Ovaj potonji je interesantan jer integrira zavarivanje (na strani aluminija) i tvrdo lemljenje (na strani pocinčanog lima) slika 17. CMT također odlikuje dobra mogućnost premošćivanja zazora pri spajanju materijala [14].

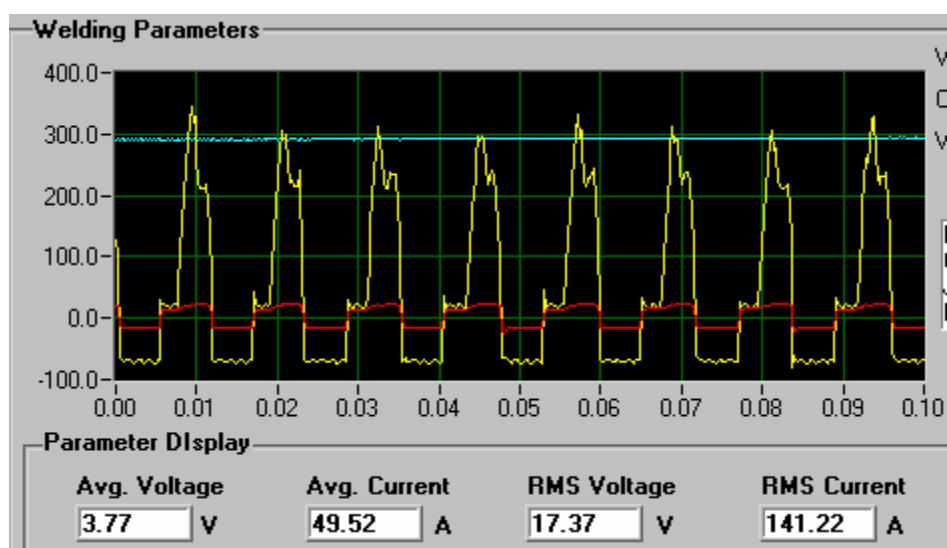


Slika 17. Makroizbrusak spoja aluminijskog i pocinčanog lima izvedenog CMT postupkom [14]

3.3.5. AC MIG

Kod MAG postupka se pretežito primjenjuje pozitivan polaritet na žici i to kod konvencionalnih i modernih postupaka. Negativan polaritet kod EPP daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju. Isti efekt postiže se i kod MAG postupka ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi nepravilno i ima dosta štrcanja. Primjena negativnog polariteta je česta kod praškom punjenih žica. Primjena promjenjivog polariteta na žici kod MAG zavarivanja tj. izmjena pozitivnog i negativnog ciklusa na žici omogućuje bolju kontrolu procesa i premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala. Izmjenom polariteta postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku tj. balansom pozitivnog i negativnog pola na elektrodi i radnom komadu. Međutim, treba napomenuti da su izvori struje za AC MIG dosta složeni i kompleksni [14]. Tipična dinamička karakteristika AC MIG postupka prikazana je na slici 18.

AC MIG primjenjuje se za tvrdo lemljenje pri čemu balans negativnog polariteta na žici znatno utječe na mogućnost premošćivanja između radnih komada [14].



Slika 18. Dinamička karakteristika $i=f(t)$ (žuti oscilogram) i $u=f(t)$ (crveni oscilogram) [14]

4. ODREĐIVANJE PARAMETARA KOD MAG ZAVARIVANJA

Izvori struje za MAG zavarivanje najčešće nemaju direktno podešavanje jakosti struje zavarivanja nego se ona mijenja podešavanjem brzine dobavljanja žice. Podešavanjem napona i struje mijenja se duljina električnog luka i način prijenosa metala u električnom luku. Podešavanje parametara MAG zavarivanja moguće je izvesti na dva načina: klasično ili pomoću sinergijskih karakteristika. Klasično podešavanje parametara MAG zavarivanja odnosi se na odvojeno podešavanje brzine dobavljanja žice, jakosti struje zavarivanja i napona. Podešavanje parametara preko sinergijskih karakteristika uvelike olakšava podešavanje parametara zavarivanja jer se podešavanjem brzine dobavljanja žice podešavaju i ostali parametri zavarivanja. Parametri se podešavaju u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala te ovisno o zaštitnom plinu [17].

4.1. Sinergijske karakteristike

Podešavanje parametara pomoću sinergijskih karakteristika (krivulja) uvelike olakšava MAG zavarivanje. Sinergijska kontrola bazira se na podešavanju preko samo jednog potenciometra te omogućava zavarivaču da odabirom jednog parametra zavarivanja automatski podesi i preostale parametre. Nakon odabira zaštitnog plina i vrste osnovnog materijala te podešavanja brzine dodavanja žice, ostali parametri se podešavaju automatski. Sinergijske krivulje su unaprijed definirane krivulje koje međusobno povezuju parametre zavarivanja. Dolaze pohranjene u memoriji izvora struje za zavarivanje. Moguće ih je naknadno mijenjati te dodavati nove. Podešavanje parametra bazirano na sinergijskim krivuljama koristi se i kod konvencionalnog MAG zavarivanja i kod impulsnog MAG zavarivanja. Kod konvencionalnog MAG zavarivanja pomoću sinergijskih krivulja napon se podešava odabirom brzine dobavljanja žice. Kod impulsnog MAG zavarivanja podešavanjem parametara osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina podešavaju se napon i svi ostali parametri impulsa [17].

S upravljačkom pločom Synergic izvor struje izračunava na temelju općih podataka, kao što su debljina lima, dodatni materijal, promjer žice i zaštitni plin, optimalnu postavku parametara zavarivanja. Time se u svakom trenutku koristi spremljeno stručno znanje. Ručne ispravke moguće je provesti u svakom trenutku. Upravljačka ploča Synergic podržava i u potpunosti ručno namještanje parametara [18].

4.2. Oprema za instaliranje sinergijskih krivulja i softvera–DataGun

DataGun (slika 19.) je uređaj koji je osmislila tvrtka Kemppi. Uređaj se koristi za programiranje, nadogradnju novih softvera za zavarivanje ili instalaciju sinergijskih karakteristika na izvoru struje za MAG zavarivanje [19]. Programi za zavarivanje, sinergijske krivulje i drugi softveri kopiraju se iz PC-a u DataGun. Instalacija se pokreće automatski priključivanjem DataGun-a na uređaj za zavarivanje (slika 20.)([19]).



Slika 19. DataGun[19]



Slika 20. DataGun priključen na izvor struje za zavarivanje [19]

5. SPECIFIČNE FUNKCIJE INVERTERSKIH IZVORA STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE

U nastavku će biti navedene specifične funkcije inverterskih izvora struje koje poboljšavaju produktivnost, povećavaju penetraciju te stabiliziraju električni luk. Pomoću tih funkcija postupak MAG zavarivanja se stalno unaprjeđuje, kvaliteta zavarenog spoja je visoka i samim time zavarivaču se omogućuje jednostavniji rad.

5.1. Wise Fusion

Karakteristika WiseFusion funkcije je da stvara i održava optimalni kratki spoj između taline osnovnog i dodatnog materijala kod impulsnog MIG/MAG postupka zavarivanja.

Držeći duljinu luka optimalno kratkom, za ručno zavarivanje (WiseFusion) i automatsko zavarivanje (WiseFusion-A), WiseFusion osigurava dosljednu kvalitetu zavarenih spojeva u svim položajima, a jednom postavljeni parametri zavarivanja, eliminiraju potrebu za redovnim prilagodbama parametara tijekom rada u različitim položajima zavarivanja. WiseFusion je funkcija namijenjena za impulsne programe za zavarivanje za FastMig Pulse i KempArc uređaje za zavarivanje [20].

Prednosti [20]:

- Automatska regulacija duljine luka na nižu vrijednost od uobičajene visine za impulsni luk za zavarivanje,
- Izvrsna kontrola taline zavora u svim položajima za zavarivanje,
- Uzak i energetski gust električni luk,
- Poboljšana kvaliteta i izgled zavarenih spojeva,
- Izvrsno čišćenje oksida kod zavarivanja Al i Al legura,
- Zavarivanje bez prskotina,
- Zavarivanje u uskom žlijebu.

WiseFusion se može primijeniti za zavarivanje aluminijskih trupova broda, slika 21.



Slika 21. Primjena WiseFusion-a, osnovni materijal aluminij [20]

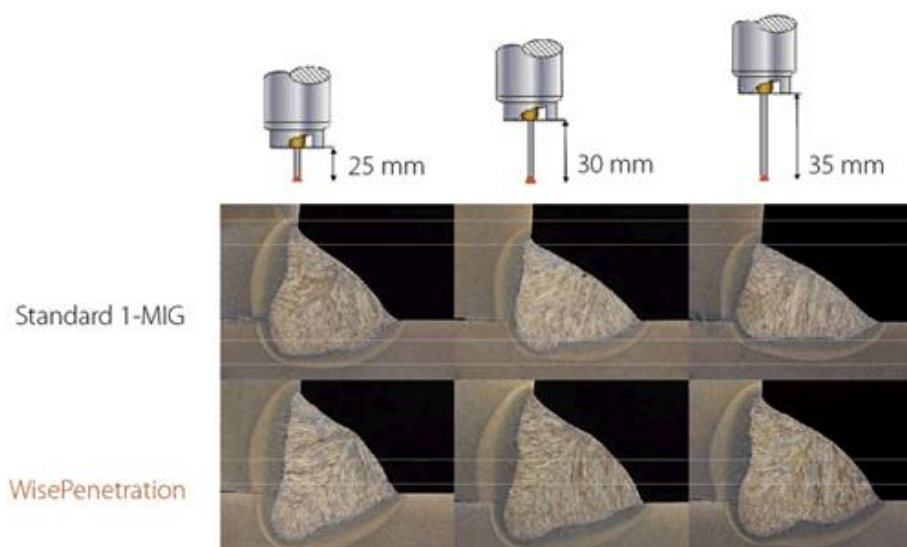
5.2. WisePenetration

WisePenetration je funkcija za zadržavanje konstantne snage zavarivanja, bez obzira na promjene u duljini slobodnog kraja žice.

WisePenetration pruža konstantnu snagu bez obzira na promjene u držanju pištolja, njegove orijentacije ili udaljenost između sapnice i radnog komada. Time je postignut cilj ostvarivanja konstantne veličine penetracije bez obzira na promjenu dužine slobodnog kraja žice (slika 22). Pogodan je za ručno i automatizirano sinergijsko MIG / MAG zavarivanje [20].

Prednosti [20]:

- Visoka kvaliteta zavarenih spojeva (malen rizik od naljepljivanja i nepotpune penetracije)
- Ušteda u vremenu izrade,
- Smanjenje troškova izrade,
- Smanjuje potrebu za česti odabir parametara zavarivanja,
- Jednostavan za korištenje i implementaciju u proizvodnji,
- Pogodno za uporabu s dugim ili kratkim polikabelima,
- Zavarivanje u uskom žlijebu.



Slika 22. Profil zavora uz promjene slobodnog kraja žice kod standardnog MAG postupka i primjenom WisePenetration funkcije [20]

Slika 23. Prikazuje mogućnost korištenja funkcije WisePenetration za zavarivanje u žlijebu.



Slika 23. Primjena WisePenetration-a [20]

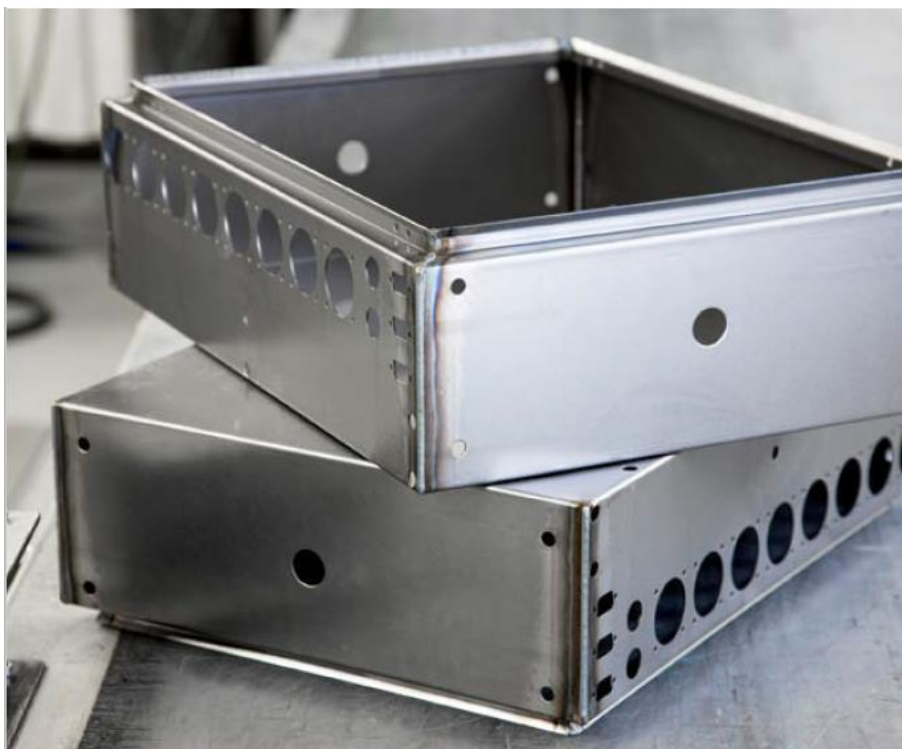
5.3. WiseThin

WiseThin je prilagođen MIG/MAG proces zavarivanja s hladnim prijenosom materijala u zavareni spoj za ručno zavarivanje (WiseThin) i automatsko zavarivanje (WiseThin-A), tankih limova i lemljenje [20].

Prednosti [20]:

- Smanjenje štrcanja kod zavarivanja svih materijala, uključujući pocinčane materijale,
- Unos topline je niži 10-25% od standardnog MAG postupka,
- Manje deformacije izratka nakon zavarivanja,
- Izvrsna kontrola taline kod različitih geometrija zavarenih spojeva,
- Veća brzina zavarivanja u mnogim aplikacijama.

Standardne primjene uključuju zavarivanje čeličnih, obojenih i pocinčanih materijala, slika 24. prikazuje metalnu kutiju za energetiku zavarenu uz pomoć funkcije WiseThin.



Slika 24. Metalna kutija zavarena Wisethin postupkom [17]

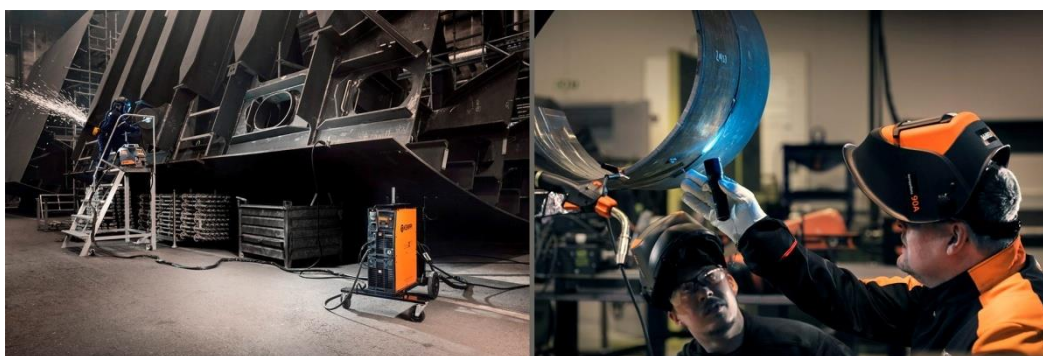
5.4. WiseRoot

WiseRoot postupak je razvijen za zavarivanje korijena, ali isto tako i za zavarivanje tankih limova. Uobičajeni materijali za zavarivanje su konstrukcijski čelici i nehrđajući čelici. WiseRoot je vrlo učinkovit i jedinstven MIG/MAG proces za ručno (WiseRoot) i automatsko (WiseRoot-A) zavarivanje korijena [20].

Prednosti [20]:

- Tri puta brži od TIG postupka zavarivanja,
- Jednostavan za korištenje,
- Mogućnost zavarivanja većih zazora,
- Nema potrebe za primjenu podloga (prstena ili keramike),
- Omogućava postizanje visoke kvalitete korijena zavora.

Slika 25. prikazuje način korištenja WiseRoot-a za zavarivanje korijena konstrukcijskog čelika.



Slika 25. Primjer korištenja WiseRoot-a [21]

5.5. PulsedDip Transfer Process – Prijenos kratkim spojem i impulsom

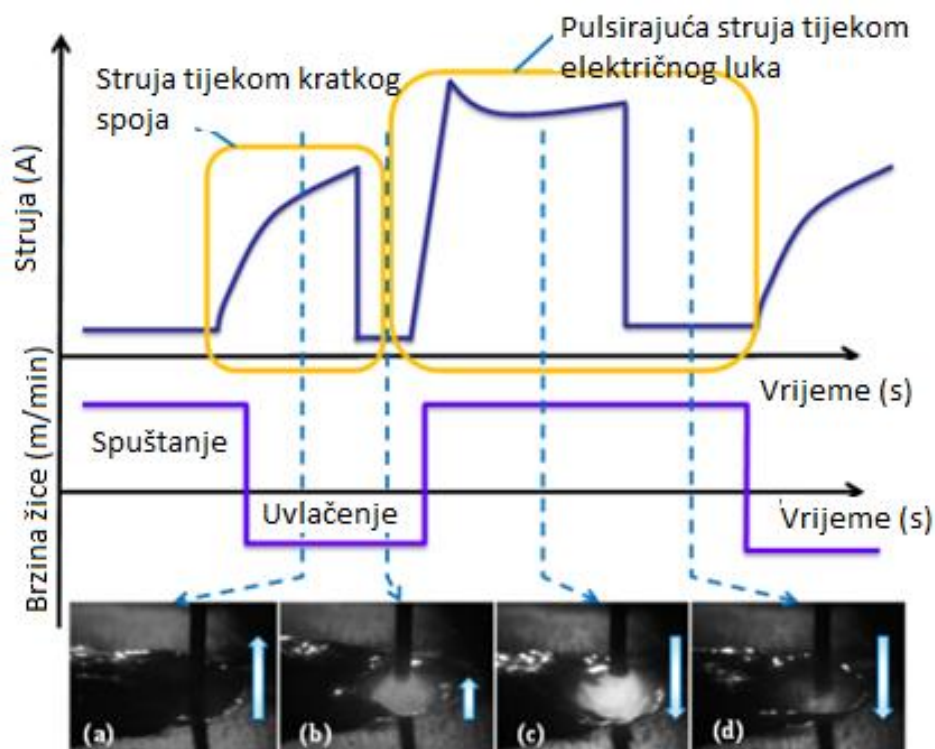
Kako bi se realizirao prijenos s minimalnim štrcanjem pri MAG zavarivanju u zaštiti CO₂ nelegiranih čelika žicom promjera 1,2 mm razvijen je proces prijenosa koji integrira kratke spojeve i impulse. Ovaj postupak je prvenstveno namijenjen za zavarivanje tankih limova visokim brzinama pri čemu je sinkronizirano dodavanje žice i valni oblik struje u ciklusima električnog luka i kratkih spojeva. Koncept je isti bez obzira dali se radi u zaštiti CO₂ ili mješavini Ar i CO₂ [22].

Na slici 26. prikazan je princip prijenosa PulsedDip Transfer Process kroz promjenu struje i brzine dobave žice u vremenu ovisno o sekvenci prijenosa materijala, kratkom spoju ili električnom luku. Prijelaz metala snimljen je visokobrzinskom video kamerom za slijedeće parametre zavarivanja: struja zavarivanja 300 A, napon zavarivanja 23 V i brzina zavarivanja 60 cm/min [22].

Nakon detekcije kratkog spoja kapljice dodatnog materijala i radnog komada, žica se povlači unatrag te se ovisno o statusu povlačenja primjenjuje optimirana struja kratkog spoja kako bi se poboljšala ponovna uspostava električnog luka.

Kadar (a) prikazuje fazu kratkog spoja. Odmah nakon ponovne uspostave električnog luka žica se povlači sve dok brzina žice ne dosegne 0 m/min te se nakon toga ponovno gura u normalnom smjeru prema talini za vrijeme faze ponovne uspostave. Za vrijeme ove faze, struja zavarivanja je smanjena kako bi se spriječio pretjerani rast rastaljene kapi na vrhu žice. Kao što se vidi na kadru (b) nema nikakvog štrcanja metala. Kada žica krene prema talini aktivira se strujni impuls koji osigurava potrebni tlak u luku koji potiskuje talinu i osigurava postizanje bolje penetracije. Istovremeno, približno ravna karakteristika konstantnog napona stabilizira prijenos kapljice za vrijeme trajanja impulsa, što je prikazano u kadru (c). U drugoj polovici faze električnog luka struja je ograničena na osnovnu vrijednost kako bi se olakšala ponovna uspostava kratkog spoja što je prikazano u kadru (d).

Kao što je već napomenuto PulsedDip Transfer Process koristi karakteristiku konstantnog napona za vrijeme impulsa kako bi se održala stalna prosječna brzina dobave bez obzira na prebacivanja smjera dodavanja žice što je neophodna funkcija za održanje stabilnog prijenosa metala.



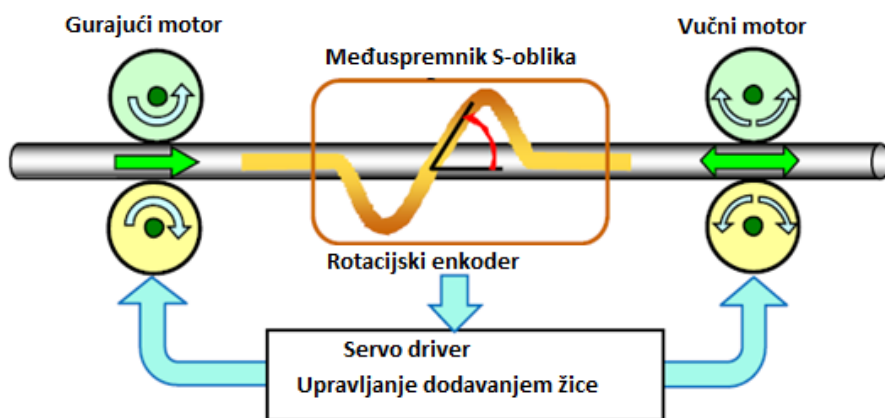
Slika 26. Princip PulsedDip Transfer Process pri zavarivanju u zaštiti CO_2 [22]

Stabilizacija prijenosa metala je ostvarena pomoću ove funkcije u sprezi sa sinergijskim efektom kontrole brzine žice na motoru koji vuče žicu. Za usporedbu, pri primjeni impulsne struje koja je veća od kritične struje vrlo je teško ostvariti prijenos metala kratkim spojevima obzirom da se počinje javljati slobodan let kapljice tj. štrcajući luk [22].

5.5.1. Upravljanje međuspremnikom žice

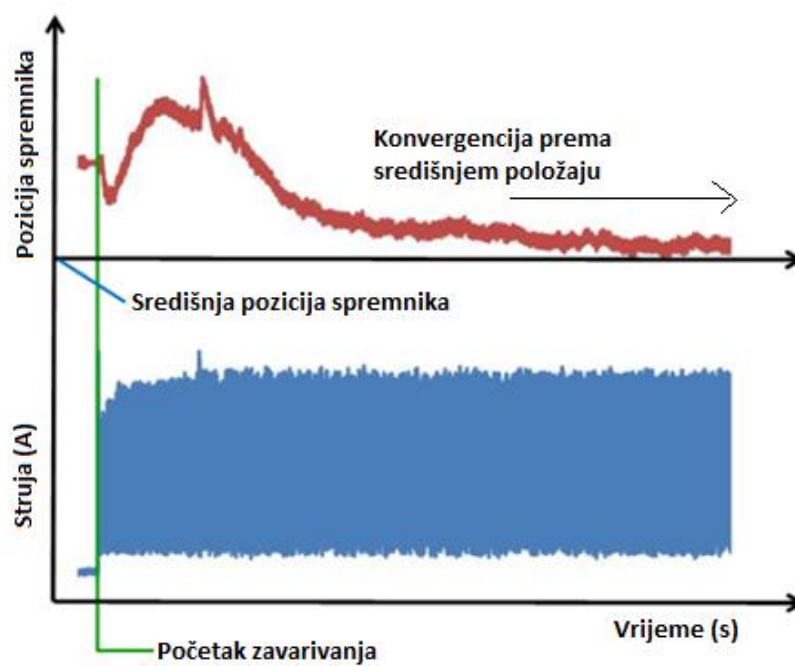
Pri PulsedDip Transfer Process zavarivanju stabilan prijenos metala se može održati pri brzini dodavanja žice od 10 m/min uz frekvenciju ciklusa kratki spoj-električni luk od 100Hz. Za prebacivanje smjera dodavanja žice prema taktu perioda 10 ms vršna vrijednost brzine dobave nakon prebacivanja mora biti barem nekoliko puta veća od prosječne vrijednosti. Zbog toga je potrebno da sustav za dobavu žice osim brzog odziva može upravljati i interferencijom kako bi se smanjilo opterećenje i pridonijelo stabilizaciji prijenosa metala. Slika 27. prikazuje shematski originalni mehanizam upravljanja međuspremnikom žice tzv. BufferPositionControl za međuspremnik S-oblika. Obzirom na smjer žice koji određuje povlačeći motor, u međuspremniku dolazi do međudjelovanja koje interferira sa smjerom dobave. Rotacijski enkoder koji je ugrađen u međuspremnik očitava kut rotacije kao

informaciju o položaju u realnom vremenu. Na osnovu informacije o položaju, brzina dobave žice koju generira gurajući motor i određena brzina žice koju generira povlačeći motor, se međusobno usklađuju i minimaliziraju pojavu interferencije. Obzirom da se kompenzira glavno gibanje žice na povlačećem motoru, pri Pulse Dip Transfer Process zavarivanju može se stabilizirati prijenos metala uz primjenu regulacije konstantnim naponom za vrijeme trajanja struje impulsa. S druge strane ako se detektira pogreška koja onemogućuje kontrolu međuspremnik proces zavarivanja se zaustavlja kako bi se spriječilo izvijanje žice [22].



Slika 27. Shematski prikaz BufferPositionControl sustava [22]

Promjena položaja međuspremnik tijekom zavarivanja prikazana je na slici 28. Jasno je vidljivo da se položaj mijenja postupno odmah nakon početka zavarivanja te zatim konvergira prema središnjem položaju. To je posljedica minimalizacije interferencije sa glavnim smjerom gibanja žice u međuspremniku žice primjenom BufferPositionControl upravljanja. Ovom funkcijom moguće je ostvariti stabilnu brzinu dodavanja čak i u slučaju ako se dogodi nagla promjena manipulatora ili nagla promjena slobodnog kraja žice pri njihanju [22].



Slika 28. Efekt djelovanja BufferPositionControl-a [22]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Uvod

Eksperimentalni dio rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno provesti ispitivanja utjecaja kvalitete sinergijske karakteristike i funkcija za kompenziranje pada struje ovisno o slobodnom kraju žice. Nakon ispitivanja bilo je potrebno ocijeniti kvalitetu sučelja sa stanovišta odabira i primjene različitih kombinacija parametara kao i utjecaj na poboljšanje kvalitete zavarivanja u realnim uvjetima.

U eksperimentu je korišteno:

- Izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 320i
- Oprema za ispitivanje sinergijskih (dinamičkih) karakteristika
- Modularni sustav pogona MDS - 1002

Ispitivanje se vršilo za tri različita slučaja slobodnog kraja žice 12, 17 i 22 mm, te za svaki taj iznos ispitalo se utjecaj kvalitete sinergijske karakteristike za tri načina korekcije visine luka (-10, 0, 10).

6.2. Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 320i dizajnirala je i proizvela tvrtka Fronius, koja predstavlja jednu od najnaprednijih i najsofisticiranijih tvrtki u ovom području. Fronius TPS 320i je jedan od najsuvremenijih inverterskih izvora struje koji ima potpuno digitaliziran mikroprocesor koji upravlja cijelim procesom zavarivanja. Uređaj karakterizira iznimna fleksibilnost, jer se može prilagoditi raznim situacijama, te ima mogućnost pohrane različitih modula zavarivanja. Tijekom procesa zavarivanja, stvarni podaci se neprekidno mjere, a uređaj odmah reagira na bilo kakve promjene. Izvor struje i korisničko sučelje prikazano je na slikama 29 i 30. Tehničke karakteristike Fronius TPS 320i prikazane su u tablici 5.



Slika 29. Izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 320i

Na korisničkom sučelju (slika 29.) podešava se način rada i postavljaju se parametri zavarivanja.



Slika 30. Korisničko sučelje izvora struje

Tablica 5. Tehničke karakteristike izvora struje Fronius TPS 320i [23]

| IZVOR STRUJE | Fronius TPS 320i | |
|------------------------|------------------|---------|
| NAČIN RADA | REL | MIG/MAG |
| PRIKLJUČNI NAPON [V] | 3x400 | |
| STRUJA ZAVARIVANJA [A] | 10-320 | 3-320 |
| NAPON ZAVARIVANJA [V] | 20,4-32,8 | 14,2-30 |
| TEŽINA [kg] | 35 | |
| DIMENZIJE (ŠxDxV) [mm] | 706x300x510 | |

6.3. Oprema za ispitivanje dinamičkih karakteristika

Oprema za ispitivanje dinamičkih karakteristika sastoji se od osciloskopa Tektronix TDS 210, strujnih kliješta PR 1030 i računala za analizu i obradu podataka dobivenih osciloskopom. Računalo je opremljeno programom WavestarTM za obradu i analizu podataka. Na slici 31. prikazan je radni stol na kojem se nalazi računalo s navedenim programom i osciloskop za ispitivanje dinamičkih karakteristika. Na slici 32. prikazana su strujna kliješta koja se spajaju na polikabel izvora struje.

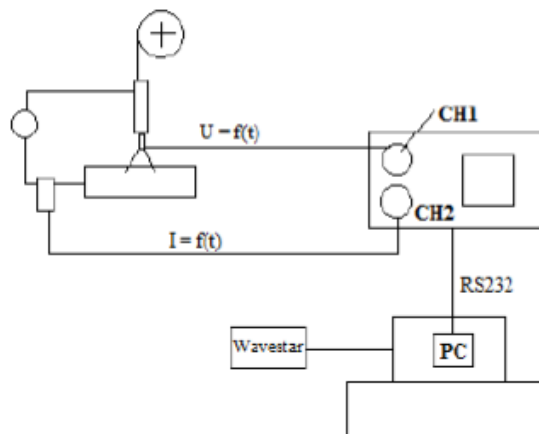


Slika 31. Oprema za snimanje dinamičkih karakteristika



Slika 32. Strujna kliješta

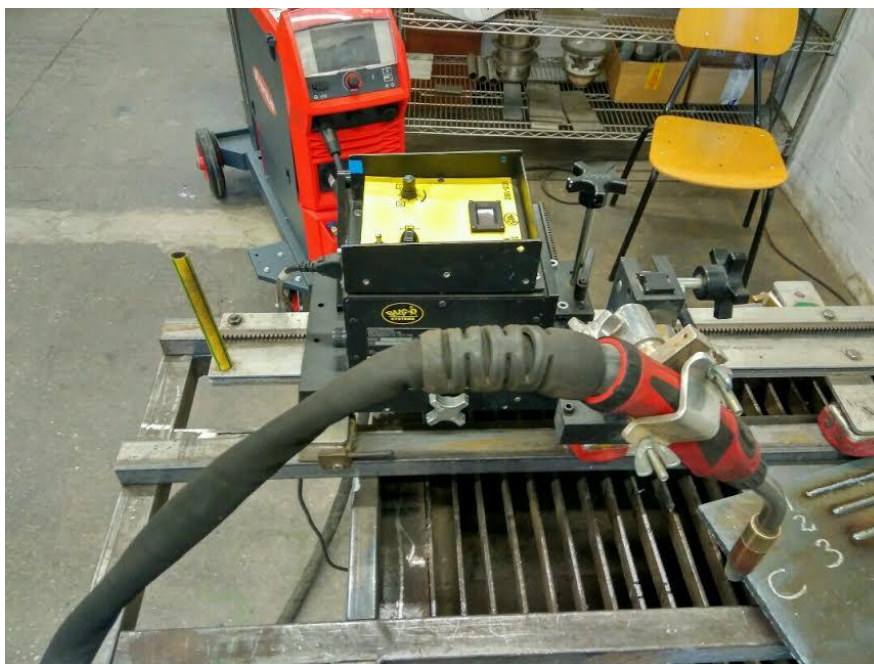
Osciloskop Tektronix TDS 210 je dvokanalni osciloskop, na kanalu 1 (CH1) snima se napon, a na kanalu 2 (CH2) snima se struja zavarivanja. Karakterizira ga veliko frekvencijsko područje i jednostavno korištenje. Na slici 33. prikazana je shema spajanja osciloskopa, izvora struje i računala.



Slika 33. Shema spajanja osciloskopa s izvorom struje i računalom [17]

6.4. Modularni sustav pogona MDS – 1002

Modularni sustav pogona MDS – 1002 je razvila i proizvela tvrtka Bug-O Systems, a koristi se za automatizirano zavarivanje s konstantnim smjerom i brzinom zavarivanja. Slika 34. prikazuje taj sustav s namještenim pištoljem za zavarivanje.



Slika 34. Modularni sustav pogona MDS -1002

6.5. Zaštitni plin

U eksperimentu je korišten zaštitni plin trgovačkog imena Ferroline C18 M21 (prema normi *EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje-plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke*). Ta plinska mješavina ima u sebi 82% Ar i 18% CO₂. Koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, širokog raspona debljina, MAG postupkom zavarivanja.

Protok plina tijekom eksperimenta bio je 18 l/min. Na slici 35. je prikazana boca zaštitnog plina korištena u eksperimentu.



Slika 35. Boca zaštitnog plina Ferroline C18

6.6. Dodatni materijal

Za dodatni materijal pri izradi eksperimenta korištena je pobakrena žica trgovačkog imena SG2, promjera 1,2 mm proizvedene u tvrtki Elektroda Zagreb d.d. Na slici 36. prikazana je specifikacija dodatnog materijala. Specifikacija daje prikaz svojstava i područja primjene dodatnog materijala, mehanička svojstva čistog metala zavara, orijentacijski kemijski sastav žice i preporučeni zaštitni plin.

NORME

| | | | |
|-----------------------|------------------------|-------------|--------|
| HRN EN ISO 14341-A | AWS / ASME SFA-5.18 | DIN 8559 | W. Nr. |
| G 42 4 C/M 3Si1 | ER70S-6 | SG 2 | 1.5125 |

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

| Grupa čelika | HRN (stari) | DIN (W. Nr.) | HRN / EN / ISO |
|-----------------------|--|---|--|
| Konstruktivski čelici | Č 0261 do Č 0545 | St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050) | S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2 |
| Kotlovski čelici | Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105 | HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473) | P235GH P265GH P295GH P355GH |
| Čelici za cijevi | Č 1212 do Č 3100 | St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) SIE 210.7 (1.0307) do SIE 360.7 (1.0582) | DX55D do P355T2 L210 do L360NB |
| Brodski čelici | A, B, D, E AH 32 do EH 36 | A, B, D, E AH 32 do EH 36 | |
| Sitnozmatni čelici | ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350 | SIE 285 (1.0486) SIE 355 (1.0562) WSIE 285 (1.0487) WSIE 355 (1.0565) | P275N P355N P275NH P355NH |
| Čelični ljev | ČL 0300 do ČL 0500 | GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551) | C18D do S355JRC |

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

| R _{eL} N/mm ² | R _m N/mm ² | A _s % | KV (-40°C) J |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------|
| > 430 | 500 - 640 | > 22 | ≥ 47 |

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

| C | Mn | Si | Cu |
|---------------|-----------|-----------|-------|
| % 0,06 - 0,13 | 1,4 - 1,6 | 0,7 - 1,0 | ≤ 0,3 |

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE


| Promjer žice mm | Namotaj |
|-------------------------|------------------------------------|
| 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 | Slobodan (S-L); žica do žice (S-S) |

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS);
RINA (3YS); TÜV

= +



Slika 36. Specifikacija dodatnog materijala [24]

6.7. Praktični dio

Eksperimentalni dio provodio se postupkom navarivanja na običnom konstrukcijskom čeliku oznake S235, debljine 10 mm. Taj čelik ima vrlo široku primjenu i vlačna čvrstoća mu se kreće oko 235 N/mm^2 . Navarivanje se izvršilo uz pomoć navedenog izvora struje i modularnog sustava pogona MDS 1002, koji omogućava konstantnu brzinu zavarivanja koja je u eksperimentu bila podešena na 25 cm/min . Navarivalo se neutralnom tehnikom zavarivanja.

Potrebno je bilo ispitati kvalitetu sinergijske krivulje za tri veličine slobodnog kraja žice (12, 17, 22 mm) i za svaku od njih još ispitati ponašanje funkcije, korekcije visine luka (eng. Arc length correction) za iznose (-10, 0, 10).

6.7.1. Analiza funkcije Arc Length Correction (korekcija visine luka)

U ovom eksperimentu provedena je analiza funkcije Korekcija visine luka izvora struje za zavarivanje Fronius TPS 320i. Ova funkcija ima raspon podešavanja od -10 do +10. Dinamičke karakteristike za ove funkciju snimane su za različite iznose slobodnog kraja žice za 12, 17 i 22 mm. Za navarivanje sveukupno 9 navara postavljena je struja 150 A, uz pomoć sinergijskih upravljačkih krivulja podešeni su i ostali parametri zavarivanja, napon je iznosio 18 V, brzina dodavanja žice $4,1 \text{ m/min}$, protok zaštitnog plina Ferrolina C18 iznosio je 18 l/min . Brzina zavarivanja namještena je na 25 cm/min . Za funkciju Korekcija visine luka odabrane su tri vrijednosti -10 (najmanja visina luka), 0 (neutralna visina luka) i +10 (najveća visina luka).

6.7.1.1. Slobodni kraj žice 12 mm

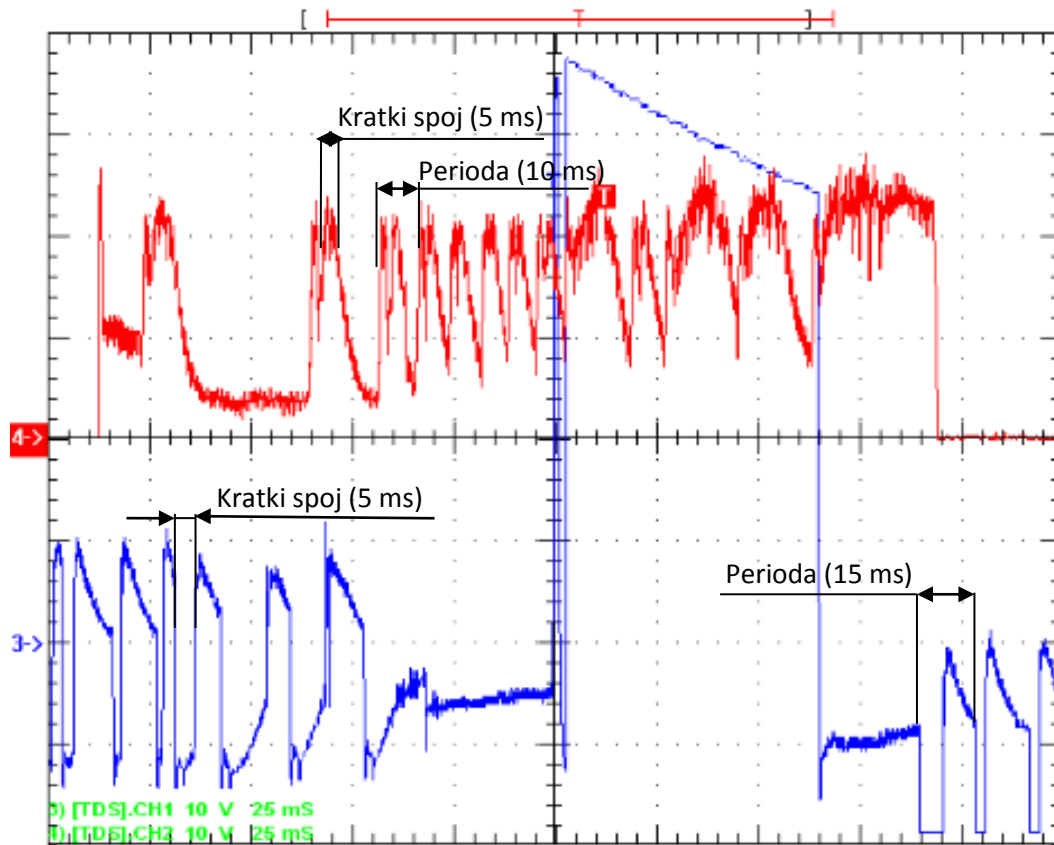
Prvo stanje pokusa radilo se za slobodni kraj žice od 12 mm. U tablici 6. prikazane su vrijednosti parametara kako su se mijenjale tokom navarivanja.

Tablica 6. Srednje vrijednosti parametara koji su se izmjenjivali tokom navarivanja za slobodni kraj žice 12 mm

| Oznaka navara | Korekcija visine luka | Struja navarivanja [A] | Napon [V] | Unos topline [kJ/cm] |
|---------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------------------|
| 1.A | -10 | 170 | 14,5 | 4,73 |
| 2.A | 0 | 170 | 16,5 | 5,38 |
| 3.A | +10 | 170 | 19,5 | 6,73 |

Na slikama 37., 39. i 41. prikazane su dinamičke karakteristike koje su snimane osciloskopom i obrađene programom WavestarTM na računalu.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10



Slika 37. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 12 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10

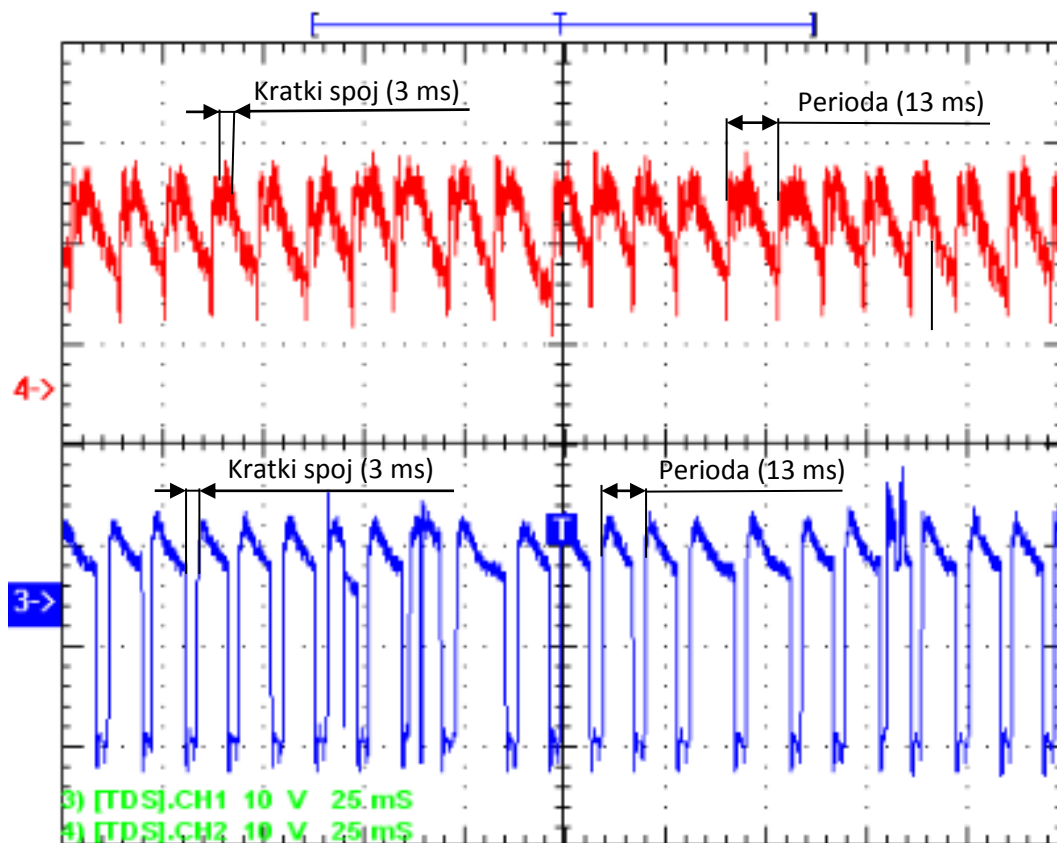
Iz oscilograma na slici 36. za vrijednost funkcije Korekcija visine luka -10 (najmanja visina luka), vidljivo je da su periode dosta nepravilne, te u jednom trenutku se dešava i veliki skok napona što ukazuje na nestabilan električni luk. Na slici 38. prikazan je izgled navara (1.A) za podešenu funkciju -10.



Slika 38. Izgled navara oznake 1.A

Na slici 38. prikazan je navar (1.A) koji je navaren nestabilnim električnim lukom. Karakterizira ga velik broj kapljica na osnovnom materijalu, koje su posljedica velikog štrcanja tokom navarivanja i nejednolik izgled.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost 0



Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 12 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost 0

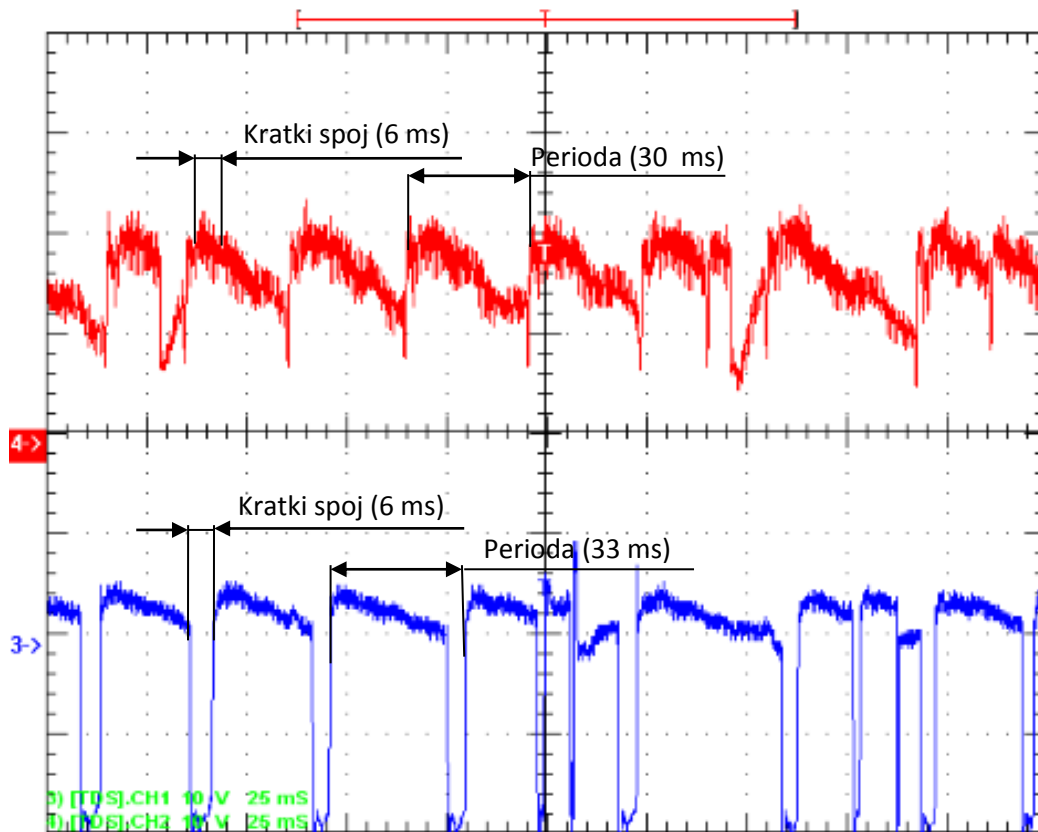
Iz oscilograma na slici 39. za vrijednost funkcije Korekcija visine luka 0 (neutralna visina luka), vidljivi su jednaki razmaci između perioda i trajanje kratkog spoja je konstantno (3 ms). Te karakteristike ukazuju na stabilan električni luk. Na slici 40. prikazan je izgled navara (2.A) za podešenu funkciju 0.



Slika 40. Izgled navara oznake 2.A

Na slici 40. prikazan je navar stabilnog električnog luka. Vidljive su sitne kapljice na osnovnom materijalu, koje su posljedica štrcanja tokom navarivanja. Njihova pojava nije karakteristična za ove parametre.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost +10



Slika 41. Oscillogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 12 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost +10

Iz oscilograma na slici 41. za vrijednost funkcije Korekcija visine luka +10 (najveća visina luka), vidljiva je mala neujednačenost perioda i trajanja kratkog spoja. Iz tih podataka reklo bi se da je električni luk granično stabilan. Prikazani navar (3.A) karakterizira dobar estetski izgled, talina je tokom navarivanja razlivena bez brazdanja i štrcanje je bilo minimalno.



Slika 42. Izgled navara oznake 3.A

6.7.1.2. Slobodni kraj žice 17 mm

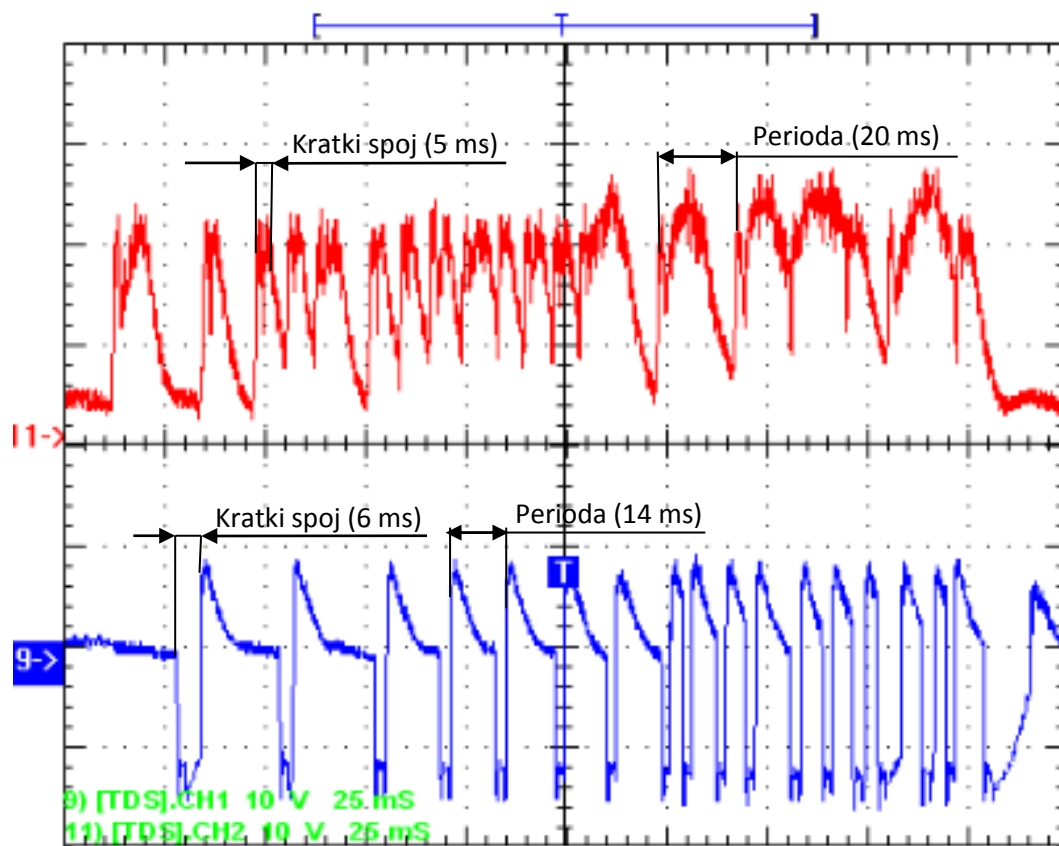
Drugo stanje pokusa rađeno je za slobodni kraj žice od 17 mm. U tablici 7. prikazane su vrijednosti parametara kako su se mijenjale tokom navarivanja.

Tablica 7. Srednje vrijednosti parametara koji su se izmjenjivali tokom navarivanja za slobodni kraj žice 17 mm

| Oznaka navara | Korekcija visine luka | Struja navarivanja [A] | Napon [V] | Unos topline [kJ/cm] |
|---------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------------------|
| 1.B | -10 | 150 | 16 | 4,61 |
| 2.B | 0 | 155 | 17 | 5,06 |
| 3.B | +10 | 160 | 20,5 | 6,29 |

Na slikama 43., 45., i 47. prikazane su dinamičke karakteristike koje su snimane osciloskopom i obrađene programom WavestarTM na računalu.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10



Slika 43. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 17 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10

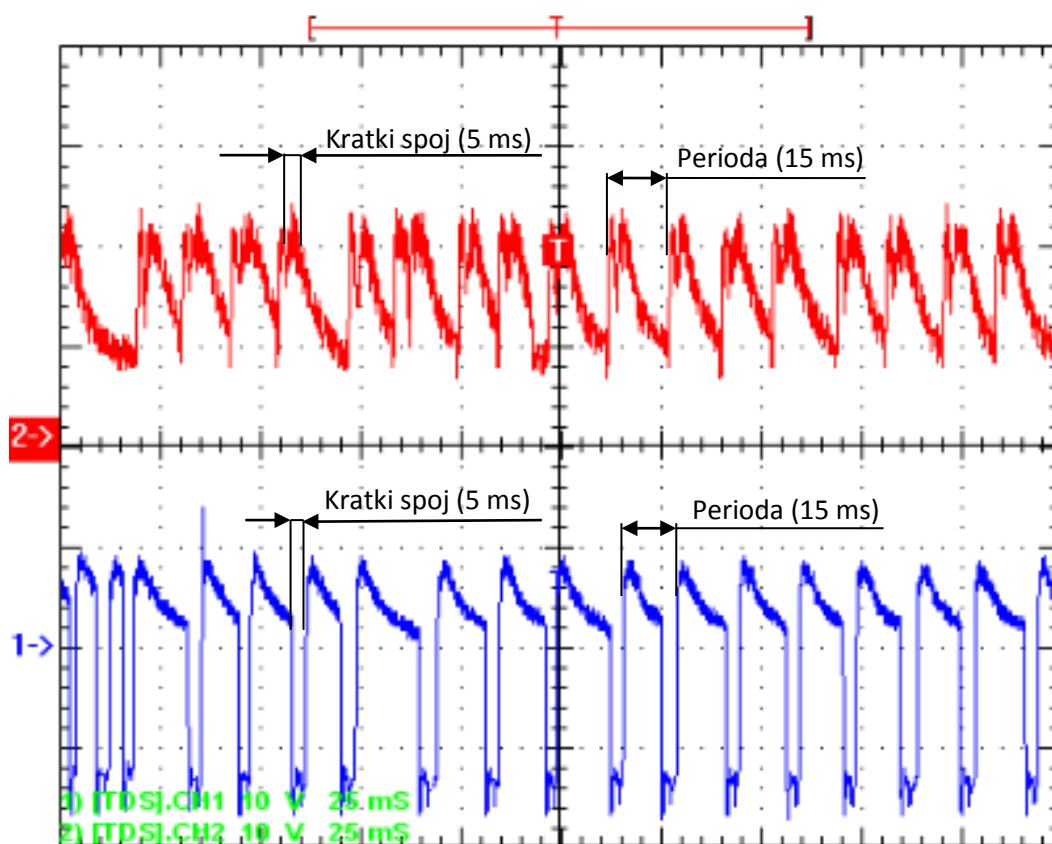
Iz oscilograma na slici 43. za vrijednost funkcije Korekcije visine luka -10 (najmanja visina luka) vidljivi su nejednoliki razmaci između perioda i trajanja kratkih spojeva. Navedene karakteristike ukazuju na to da je električni luk nestabilan. Ako se usporedi dinamička karakteristika električnog luka navara 1.A i navara 1.B vidljivo je, da je za manji slobodni kraj žice električni luk nestabilniji, kojeg karakteriziraju nekontrolirani skokovi napona i struje. Na slici 44. prikazan je izgled navara (1.B) za podešenu funkciju -10.



Slika 44. Izgled navara oznake 1.B

Može se opaziti sa slike 44., da je zbog kapljica na osnovnom materijalu, tijekom navarivanja bilo prisutno jako štrcanje. Oblik navara je nejednolik i površina mu je narebrena.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost 0



Slika 45. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 17 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost 0

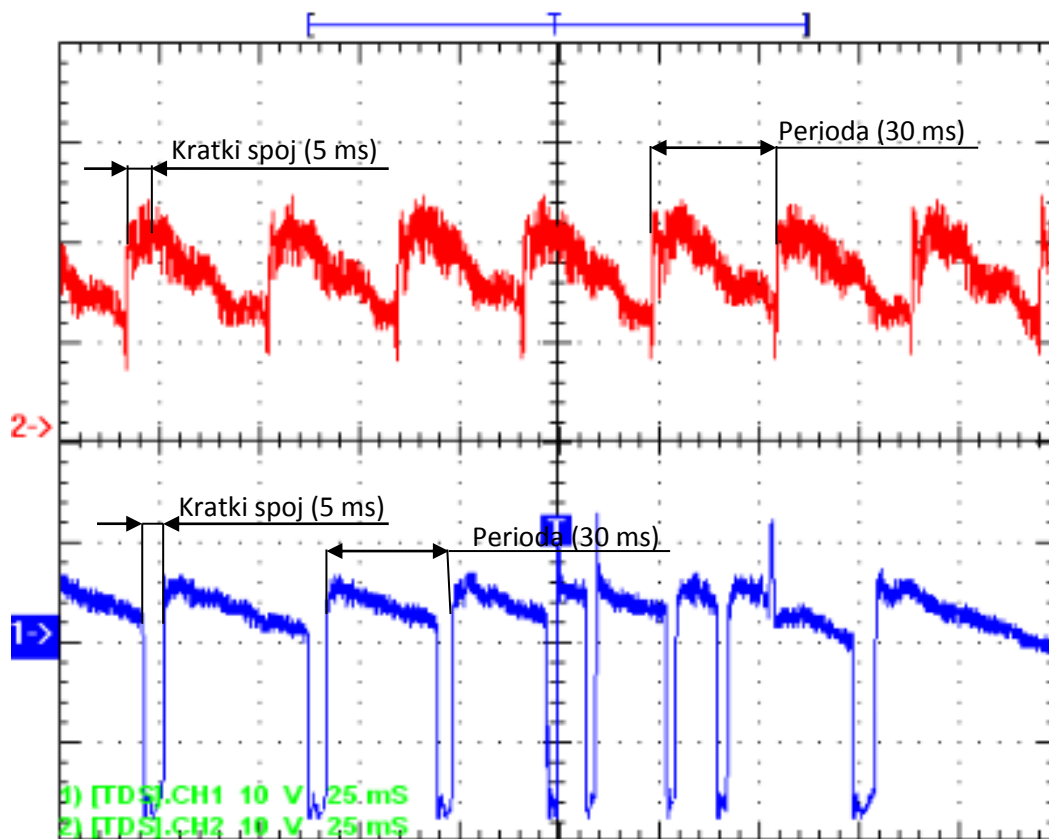
Iz oscilograma na slici 45. za vrijednost funkcije Korekcija visine luka 0 (neutralna visina luka), vidljivo je jednako vrijeme trajanja perioda (15 ms) i kratkog spoja (5 ms). Te karakteristike ukazuju na stabilan električni luk. Na slici 46. prikazan je izgled navara (2.B) za podešenu funkciju 0.



Slika 46. Izgled navara oznake 2.B

Na slici 46. prikazan je navar (2.B) stabilnog električnog luka. Odlikuje ga izvrstan estetski izgled i kvaliteta. Tokom navarivanja nije se pojavilo štrcanje i po cijeloj dužini se jednoliko razlila talina bez brazdanja.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost +10



Slika 47. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 17 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost +10

Na prikazanom oscilogramu (slika 47.) za vrijednost Korekcije visine luka +10 (najveća visina luka), vide se male nejednakosti između perioda i trajanja kratkog spoja, ali te nejednakosti ne utječu na kvalitetu navara i na njegov izgled. Dakle radi se o stabilnom električnom luku. Na slici 48. prikazan je navar 3.B kojeg karakterizira dobar estetski izgled, ujednačenost kroz cijelu dužinu. Tokom navarivanja štrcanje nije bilo prisutno, te se talina razlila ravnomjerno bez brazdanja. Širina navara se je povećala u odnosu na ranije primjere navara, što se je i očekivalo jer se je napon povećao.



Slika 48. Izgled navara oznake 3.B

6.7.1.3. Slobodni kraj žice 22 mm

Treće stanje pokusa rađeno je za slobodni kraj žice od 22 mm. U tablici 8. prikazane su vrijednosti parametara kako su se mijenjale tokom navarivanja.

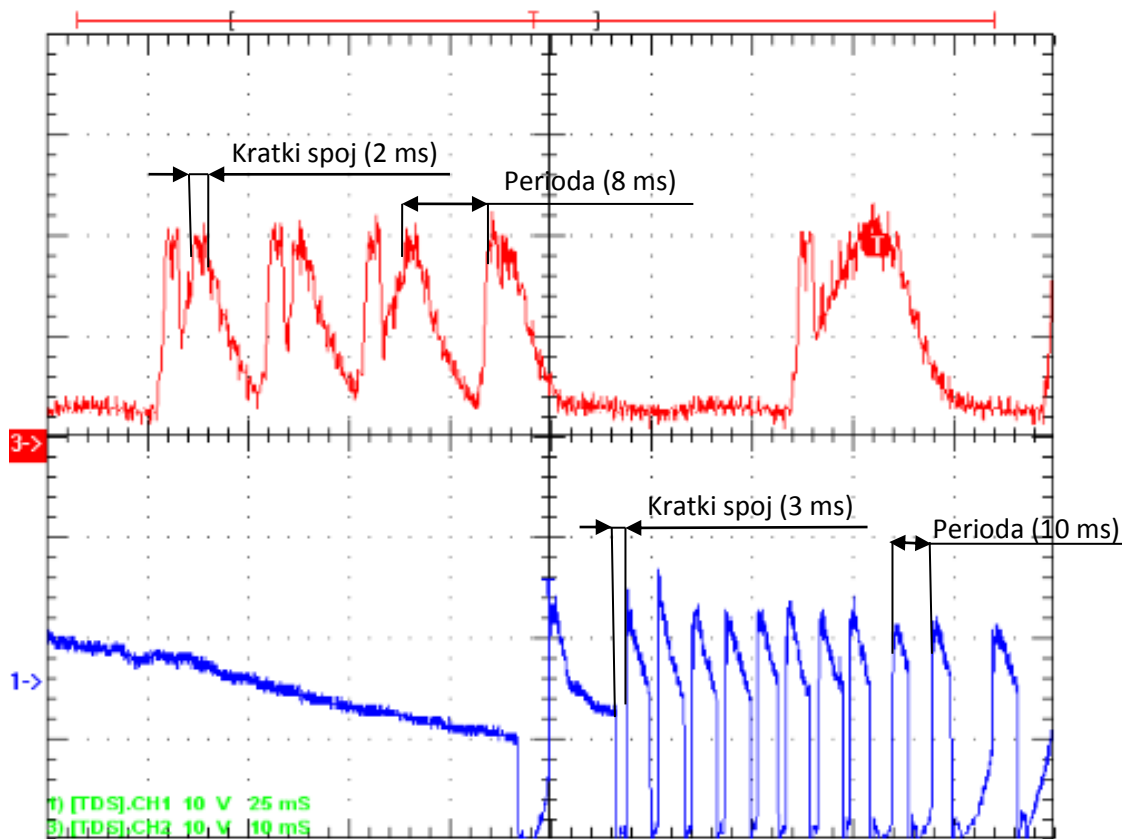
Tablica 8. Srednje vrijednosti parametara koji su se izmjenjivali tokom navarivanja za slobodni kraj žice 22 mm

| Oznaka navara | Korekcija visine luka | Struja navarivanja [A] | Napon [V] | Unos topline [kJ/cm] |
|---------------|-----------------------|------------------------|-----------|----------------------|
| 1.C | -10 | 140 | 14 | 3,76 |
| 2.C | 0 | 148 | 18 | 5,11 |
| 3.C | +10 | 150 | 21 | 6,04 |

Na slikama 49., 51. i 53. prikazane su dinamičke karakteristike koje su snimane osciloskopom i obrađene programom WavestarTM na računalu.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10

Na slici 49. prikazane su dinamičke karakteristike za vrijednost Korekcije visine luka -10 (najmanja visina luka). Karakterizira ga neujednačenost trajanja perioda i kratkog spoja. Električni luk je nestabilan.



Slika 49. Oscillogram dinamičke karakteristike $u, i = f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 22 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost -10

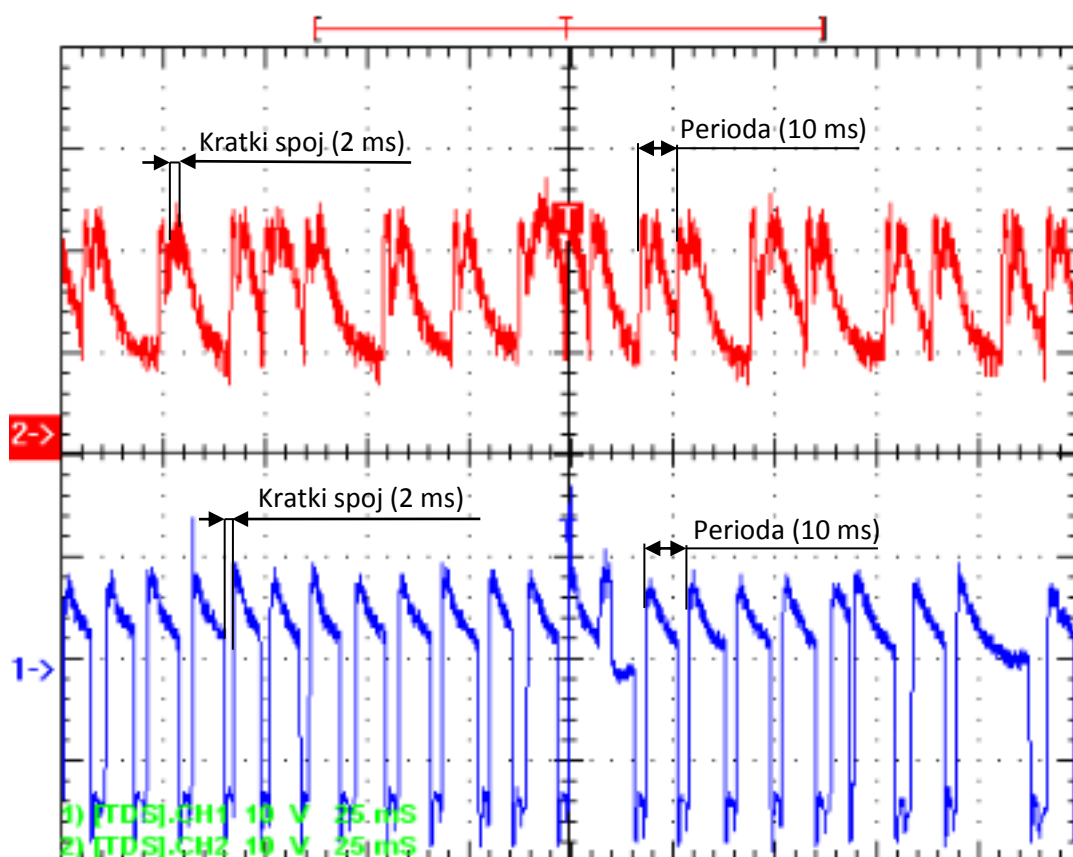
Na slici 50. prikazan je izgled navara (1.C) za podešenu funkciju -10.



Slika 50. Izgled navara oznake 1.C

Na slici 50. prikazan je navar koji je karakterističan za nestabilan električni luk. Na površini osnovnog materijala ima puno kapljica što ukazuje na veliko štrcanje tokom navarivanja. Oblik zavara je nejednolik po dužini i širini, te mu je površina narebrena.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost 0



Slika 51. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 22 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost 0

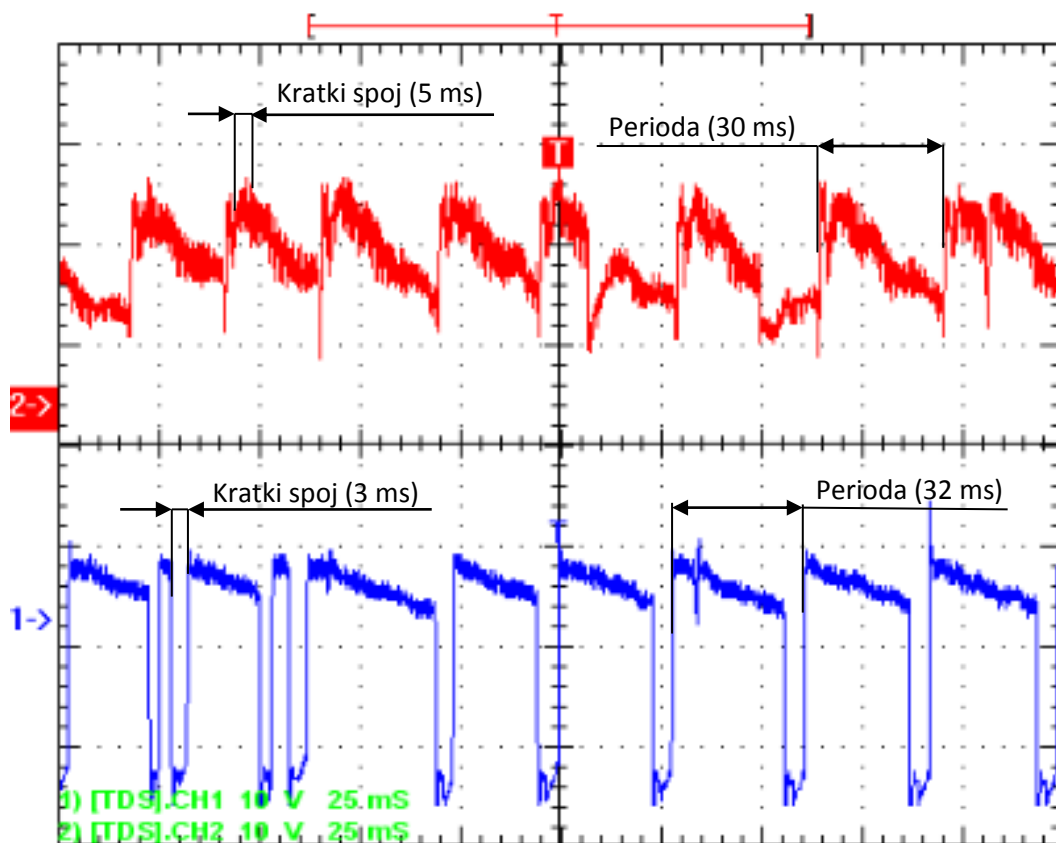
Na slici 51. prikazane su dinamičke karakteristike napona i struje za iznos korekcije visine luka 0 (neutralna visina luka). Sa slike je vidljivo da periode imaju jednaka vremena trajanja (10 ms). Kratki spoj također ima konstantno vrijeme trajanja (2 ms). Radi se o stabilnom električnom luku. Na slici 52. prikazan je izgled navara (2.C) za postavljenu funkciju 0.



Slika 52. Izgled navara oznake 2.C

Na slici 52. prikazan je navar stabilnog električnog luka. Na osnovnom materijalu vidljiva je mala prisutnost kapljica, koje su posljedica blagog štrcanja tokom navarivanja. Štrcanje nije karakteristično za tako postavljene parametre.

Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost +10



Slika 53. Oscilogram dinamičke karakteristike $u, i=f(t)$ pri MAG navarivanju za slobodni kraj žice 22 mm i Korekcija visine luka za postavljenu vrijednost +10

Na slici 53. prikazane su dinamičke karakteristike napona i struje za iznos Korekcije visine luka +10 (najveća visina luka). Vidljive su lokalne nejednakosti trajanja perioda i kratkog spoja. Radi se o granično stabilnom električnom luku. Na slici 54. prikazan je navar (3.C) za postavljenu funkciju +10. Nisu se pojavile kapljice koje bi bile posljedica štrcanja tokom navarivanja, te navar cijelom svojom dužinom ima ujednačen izgled. Dakle, lokalne nejednakosti perioda i kratkog spoja nisu utjecale na izgled navara.



Slika 54. Izgled navara oznake 3.C

6.8. Analiza rezultata:

U tablici 9. prikazana su vremena trajanja perioda i kratkog spoja kako su se mijenjala tokom navarivanja za različito postavljene parametre. Vrijednosti trajanja kratkog spoja i perioda očitane su iz oscilograma za naponski signal jer je pregledniji od strujnog.

Tablica 9. Prikaz promjene vremena trajanja perioda i kratkog spoja u eksperimentu

| Oznaka navara | Slobodni kraj žice [mm] | Korekcija visine luka | Trajanje kratkog spoja [ms] | Trajanje perioda [ms] |
|---------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 1.A | 12 | -10 | 5 | 15 |
| 2.A | 12 | 0 | 3 | 13 |
| 3.A | 12 | +10 | 6 | 33 |
| 1.B | 17 | -10 | 6 | 14 |
| 2.B | 17 | 0 | 5 | 15 |
| 3.B | 17 | +10 | 5 | 30 |
| 1.C | 22 | -10 | 3 | 10 |
| 2.C | 22 | 0 | 2 | 10 |
| 3.C | 22 | +10 | 3 | 32 |

Iz tablice 9. vidljivo da je najveće vrijeme trajanja perioda u sva tri slučaja slobodnog kraja žice najveća za iznos Korekcije visine luka +10. Naime, za taj iznos Korekcije visine luka (+10) znatno je povećan period trajanja električnog luka. Iz prikazanih rezultata vidljivo je, da je za manje iznose Korekcije visine luka (-10, 0) frekvencija veća, trajanje kratkog spoja je kraće.

Tokom eksperimenta kako se povećavao slobodni kraj žice struja navarivanja je padala (povećanje otpora), unesena toplina se smanjivala, a napon se povećavao.

Vidljivo je da u sva tri pokusa najnestabilniji električni luk se javljao za iznos Korekcije visine luka -10. Periode su bile neujednačene, te dinamičke karakteristike napona i struje navarivanja imale su nekontrolirane skokove. Navari (1.A, 1.B, 1.C) su neujednačenog profila po dužini i širini te je tokom navarivanja bilo prisutno jako štrcanje.

Za neutralnu visinu luka 0 u sva tri pokusa kod dinamičkih karakteristika jednoliko su raspoređene periode i trajanje kratkog spoja kod struje i napona je jednako. Navari (2.A, 2.B, 2.C) za tu vrijednost korekcije visine luka pravilnog su izgleda kroz cijelu dužinu te nema

kapljica na osnovnom materijalu. Navedena svojstva su karakteristike stabilnog električnog luka.

Za najveću visinu luka +10 u sva tri pokusa dinamičke karakteristike struje i napona imale su blage lokalne nestabilnosti, male razlike između trajanja perioda napona i struje. Te lokalne nestabilnosti nisu utjecale na izgled i kvalitetu navara (3.A, 3.B, 3.C) jer kod tog parametra nisu vidljive kapljice na osnovnom materijalu, koje su posljedica štrcanja. Dakle, radi se o stabilnom električnom luku.

Iz provedenog eksperimenta vidljivo je da za korištenje funkcije Korekcije visine luka (eng. Arc length correction) u rasponu vrijednosti od 0 (neutralna visina luka) do +10 (najveća visina luka) daje stabilan električni luk, što potkrepljuju izgledi navara (2.A, 2.B, 2.C, 3.A, 3.B, 3.C). Dakle, za postupak zavarivanja u realnim uvjetima uz uključenje navedene funkcije najbolje je koristiti u rasponu od 0 (neutralna visina luka) do +10 (najveća visina luka). Uz pravilno postavljanje osnovnih parametara uz pomoć sinergijskih karakteristika i korištenje ove funkcije u navedenom rasponu garancija su za zavar visoke kvalitete i dobrog estetskog izgleda.

7. ZAKLJUČAK

MAG postupak zavarivanja se kao najzastupljeniji postupak u industriji nekako najviše ističe u napretku i razvoju novih softvera i funkcija koje pospješuju sam postupak. U današnje vrijeme kad se teži što kraćem vremenu izrade i visokoj kvaliteti izratka, potreban je razvoj visokoproduktivnih postupaka.

Ideja suvremenih izvora struje je da se smanji unos topline, poveća mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala, bez štrcanja, ušteda energije, visoka kvaliteta zavarenog spoja, povećana produktivnost, konstantna penetracija, velike brzine zavarivanja, dobro korijensko zavarivanje, jednostavno korištenje. Tvrtke koje budu uspijevale u razvijanju, usavršavanju i ispunjavanju zahtijeva modernih industrija imat će primat na tržištu izvorima struje za zavarivanje. Tvornicama kojima je cilj stalni napredak i visoki položaj na tržištu, neće biti dovoljni samo suvremeni izvori struje, već im je isto tako bitno i educirano profesionalno osoblje koje će znati koristiti sve mogućnosti upravljanja suvremenih izvora.

Podešavanje parametara kod modernih izvora struje kod MAG zavarivanja uz pomoć sinergijskih karakteristika znatno pojednostavljuje sam postupak. Ta mogućnost znači da je dovoljno postavljanje samo jednog parametra kao npr. struje zavarivanja dok se ostali parametri postave automatski.

U eksperimentalnom dijelu uočena je korisnost funkcije Korekcija visine luka (eng. Arc length correction) koja ima raspon podešavanja od -10 do +10. Navedena funkcija testirana je za tri veličine slobodnog kraja žice (12, 17, 22 mm), te je izveden zaključak da daje najbolje rezultate, odnosno najbolju kvalitetu navara u rasponu od 0 do +10.

Sve analizirane funkcije modernih izvora struje kod MAG zavarivanja imaju jednake zadatke a to je povećanje stabilnosti električnog luka, povećanje penetracije te potpuna eliminacija kapljica na osnovnom materijalu, odnosno štrcanja. Navedene tvrdnje pokazale su se točnim i potvrđene su analizom funkcije korekcije visine luka u eksperimentalnom dijelu rada.

LITERATURA:

- [1] Babić, Nikola: Analiza dinamičke karakteristike MAG CBT zavarivanja, Završni rad, Fakultet strojarstva i Brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] <http://www.ram-rijeka.com/Osnovnipostupcizavarivanja>, dostupno 11.1.2017.
- [3] Kralj S., Andrić Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [4] http://www.lincolnelectric.com/assess/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/C4200.pdf, dostupno 10.1.2017.
- [5] MIG_MAG_zavl_EWE_2010, predavanja iz kolegija Postupci zavarivanja
- [6] http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf, dostupno 20.1.2017.
- [7] K. Shinagawa, Essential Factors in gas metal arc welding, Kobe Steel LTD, 4. Izdanje, Tokio 2011.
- [8] http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handbook/592mig4_hm, dostupno 1.2.2017.
- [9] http://www.millerwelds.com/pdf/mig_handbook.pdf dostupno 1.2.2017.
- [10] Welding processes, Welding Handbook, vol.2, 8.izdanje, AWS, Miami
- [11] Priručnik za zavarivanje – Elektroda Zagreb, Zagreb 1987.
- [12] Garašić I., Kožuh Z.: Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015
- [13] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-based-power-detail.aspx>, dostupno 5.2.2017.
- [14] Garašić I., Kožuh Z., Kralj S.: Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [15] Bajs Marko: Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [16] Garašić I., Kralj S., Kožuh Z.: Zavarivanje i srodne tehnike, Zavarivanje 54, str 61-67, Zagreb, svibanj – kolovoz 2011.
- [17] Bilandžija, Josip: Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [18] http://www.fronius.com/cps/rdx/bcrSID5F47BC94/fronius_international/42_0426_0258_HR1366352_snapshot.pdf, dostupno 10.2.2017.
- [19] <http://www.kemppi.com/en-us/offering/product/datagun> dostupno 10.2.2017.

- [20] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/6.%20SEMINAR/RADOVI/1.Softveri%20u%20ulozi%20unaprijedjenja%20opreme%20za%20zavarivanje.pdf>, dostupno 11.2.2017.
- [21] <http://www.power-tehnology.com/contractors/operations/kemppi-oy>, dostupno 12.2.2017.
- [22] Garašić I., Upravljanje prijenosa metala primjenom sinhronizirane kontrole dodavanja žice i valnog oblika struje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [23] <http://www.4pro.com.gr/wp-content/uploads/TPSi-operation-manual-GB.pdf>, dostupno 12.2.2017.
- [24] <http://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html> dostupno 15.2.2017.

PRILOZI:

1 CD-R-disc-PDF verzija završnog rada